

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİSMİK İZOLATÖR ELEMANLARININ ENERJİ BAZLI OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OSMAN SEVİNDİK

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ ERDEM ÇERÇEVİK

BİLECİK, 2025

10702911

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİSMİK İZOLATÖR ELEMANLARININ ENERJİ BAZLI OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OSMAN SEVİNDİK

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİ ERDEM ÇERÇEVİK

BİLECİK, 2025

10702911

BEYAN

Sismik İzolatör Elemanlarının Enerji Bazlı Optimizasyonu adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Destegin türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Osman SEVİNDİK

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Eğitim hayatım boyunca bana destek olan, bilgi ve deneyimlerini cömertçe paylaşarak bugünlere gelmemde katkı sağlayan tüm değerli hocalarıma içten bir saygı ve minnetle teşekkür ediyorum. Yüksek lisans eğitimim boyunca kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana her konuda rehberlik eden, araştırmanın planlanmasından yazım aşamasına kadar özveriyle yardımcı olan, her adımda destek veren, teşvik edici yaklaşımıyla ilerlememi sağlayan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali Erdem ÇERÇEVİK’e gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatımın her alanında desteklerini esirgemeyen aileme, beni cesaretlendirip düştüğüm zaman devam etmemi sağlayan sevgili eşime en derin minnettarlığımı sunarım.

Osman SEVİNDİK

2025

ÖZET

SİSMİK İZOLATÖR ELEMANLARININ ENERJİ BAZLI OPTİMİZASYONU

Deprem tehlikesi altındaki yapılarda sismik izolasyon uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Sismik izolasyon tasarımı yapı tepkilerine göre yapılmaktadır. Özellikle kritik öneme sahip yapılarda ise sismik izolasyon sistemlerinin tasarımı yapı performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada kurşun çekirdekli kauçuk sismik izolasyon parametreleri enerji bazlı optimize edilmiştir. Öncelikle akma deplasmanı, karakteristik dayanım ve izolasyon periyodunun kombinasyonlarını içeren 200 farklı izolasyon sistemi üretilmiştir. Üretilen sismik izolasyon sistemleri örnek üst yapıların taban katına yerleştirilerek zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Üst yapı modeli olarak 3, 6 ve 9 katlı moment aktaran çelik çerçeveler kullanılmıştır. Analizler 7 farklı yer hareketi kullanılarak SAP2000 programında tamamlanmıştır. Çok sayıdaki analizi tamamlamak için Matlab'ta SAP2000'e entegre bir yazılım geliştirilmiştir. Giren enerji ile yapı tepkileri kıyaslanarak giren enerjinin sismik izolasyon parametrelerinin optimizasyonunda kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Amaç fonksiyonu olarak giren enerjinin kullanıldığı Gri kurt algoritması yardımı ile sismik izolasyon parametreleri optimize edilmiştir. Ayrıca çatı katı ivmesi, izolasyon deplasmanı ve sönüme bağlı grafik bir yöntem önerilmiştir. Gri kurt algoritması ile grafik yöntemle hesaplanan optimum izolasyon parametreleri karşılaştırılmıştır. İki yöntemle elde edilen optimum izolasyon parametrelerinin üst yapıda oluşturdukları yapı tepkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sismik izolasyon parametrelerinin optimizasyonunda enerji esaslı yöntemlerin tatmin edici sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sismik izolasyon, GWO, optimizasyon, çelik yapılar

ABSTRACT

ENERGY-BASED OPTIMIZATION OF SEISMIC ISOLATION ELEMENTS

Seismic isolation applications are increasing day by day in structures under earthquake hazards. The seismic isolation systems are modeled according to the building responses. Especially, the design of seismic isolation systems significantly affects the performance of the structure in critical buildings. In this study, lead core rubber seismic isolation parameters were optimized based on energy. Firstly, 200 different isolation systems were generated, with combinations of yield displacement, characteristic strength and isolation period. The generated seismic isolation systems were placed under the base floor of the sample superstructures and nonlinear time history analyses were performed. 3, 6 and 9 story moment-resisting frames are used as the superstructure models. The analyses were completed in SAP2000 using 7 different ground motions. The software integrated with SAP2000 was developed in Matlab in order to complete the large number of analyses. It has been revealed that the input energy can be used in the optimization of seismic isolation parameters by comparing the input energy with the structure responses. The seismic isolation parameters were optimized via Gray Wolf algorithm, where the input energy is used as the objective function. Additionally, a graphical method based on peak roof acceleration, isolation displacement and damping is proposed. The optimum isolation parameters calculated with the gray wolf algorithm and the graphical method were compared. The effects of the optimum isolation parameters derived from the two methodologies on structural responses have been examined in the superstructure. According to the obtained results, it was determined that energy-based methods gave satisfactory results in the optimization of seismic isolation parameters.

Keywords: seismic isolation, GWO, optimization, steel structures

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam	4
1.2. Literatür Araştırması.....	6
1.2.1. Enerji.....	6
1.2.2. Sismik İzolatörler	12
1.2.3. Sezgisel Algoritmalar	18
2. KAVRAMLAR.....	20
2.1. Enerji Esaslı Tasarım.....	20
2.1.1. Enerji Kavramı	20
2.1.2. Enerji Tanımı	21
2.1.3. Enerji Bileşenleri.....	23
2.1.3.1. Giriş Enerjisi.....	23
2.1.3.2. Histeretik Enerji.....	24
2.2. Enerji Tüketim Sistemleri.....	25
2.2.1. Kayma Tipi İzolatörler	29
2.2.2. Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler (FPS)	29
2.2.3. Esnek-sürtünmeli taban mesnet sistemi (R-FBI)	30
2.2.4. Kauçuk Kullanılan İzolatörler.....	30

2.2.4.1. Düşük sönümlü doğal kauçuk mesnet sistemleri (LDRB).....	31
2.2.4.2. Yüksek sönümlü doğal kauçuk mesnet sistemleri (HDNR).....	31
2.2.4.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör	32
2.2.4.4. Kurşun Çekirdekli İzolasyon Sistemlerinin Mekanik Özellikleri.....	33
2.2.4.5. Kurşun Çekirdekli Sismik İzolasyon Sistemlerinin Klasik Tasarımı.....	36
3. MATERYAL-METOT	38
3.1. Üst Yapı Modeli	38
3.2. Dinamik Analizler İçin Deprem Kayıtlarının Seçilmesi	42
3.3. Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Grey Wolf Optimizer, GWO)	45
3.3.1. Matematiksel Model	46
3.3.2. Avın Etrafını Sarma	46
3.3.3. Avlanma	48
3.3.3.1. Avına saldırı	49
3.3.3.2. Avları Arama.....	50
3.4. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörün Tasarımı ve Önerilen Yöntem	50
3.4.1. Giren Enerji ile Yapı Tepkileri Karşılaştırması	51
3.4.2. Grafik Yöntemle Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi.....	53
3.4.3. Gri kurt Algoritması ile İzolasyon Parametrelerinin Optimizasyonu	54
4. BULGULAR	56
4.1. Sismik İzolasyonlu Yapı Tepkilerinin Giren Enerji ile Kıyaslanması.....	56
4.1.1. Giren Enerji ile Yapı Tepkileri Karşılaştırmaları	57
4.1.1.1. Giren Enerji ile Deplasman Karşılaştırmaları	57
4.1.1.2. Giren Enerji ile Çatı Katı İvmeleri Karşılaştırılması	58
4.1.1.3. Giren Enerji ile Sönüm Karşılaştırılması	60
4.1.1.4. Giren Enerji ile Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması	61
4.1.2. Katlara Göre Yapı Tepkilerinin Karşılaştırılması	62
4.1.3. Depremlere Göre Yapı Tepkilerinin Karşılaştırılması	63

4.1.3.1. Depremlere Göre Giren Enerjilerin Karşılaştırılması.....	63
4.1.3.2. Depremlere Göre Deplasmanların Karşılaştırılması	65
4.1.3.3. Depremlere Göre İvmelerin Karşılaştırılması.....	66
4.1.3.4. Depremlere Göre Sismik İzolasyon Sisteminin Sönümlerin Karşılaştırılması	67
4.1.3.5. Depremlere Göre Taban Kesmenin Karşılaştırılması.....	69
4.2. Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi için Önerilen Grafik Yöntem	70
4.3. GWO ile Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi	76
4.4. Grafik ve GWO sonuçlarının karşılaştırılması.....	77
5. SONUÇLAR	79
KAYNAKÇA	83

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Örnek üst yapı modelinin aks sayıları ve eleman kesitleri	39
Tablo 3.2. Örnek üst yapı modelinin tabanı ankastre modellendiğinde doğal titreşim periyotları.....	40
Tablo 3.3. Zaman tanım alanında analizler için seçilen deprem yer hareketleri ve karakteristikleri.	43
Tablo 3.4. Çalışma kapsamında incelenen örnek üst yapı modelleri ve izolasyon parametreleri	51
Tablo 4.1. Optimum izolasyon parametreleri ile izolasyonlu örnek model için belirlenen enerji dengeleri	72
Tablo 4.2. Giren enerji ve histeritik enerji farkının giren enerjiye oranı	74
Tablo 4.3. GWO ile Optimum İzolasyon Parametreleri	77

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji dağılımı şeması	21
Şekil 2.2. Yatay kuvvet etkisindeki BSD elastik sistemin matematiksel modeli	22
Şekil 2.3. Konvansiyonel Yapının Şekil Değişikliği	28
Şekil 2.4. Sismik İzolatörlü Yapının Şekil Değişikliği	28
Şekil 2.5. Sürtünmeli Sarkaç sisteminin parametreleri	30
Şekil 2.6. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDRB)	31
Şekil 2.7. Tipik yüksek sönümlü doğal kauçuk	32
Şekil 2.8. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörün Yapısal Detayı.....	33
Şekil 2.9. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörün Histeretik Kuvvet Deplasman Grafiği.....	34
Şekil 3.1. Çalışmada Kullanılan Üst Yapı Örneği.....	39
Şekil 3.2. Sap2000 Yapı Modeli (3 Katlı)	40
Şekil 3.3. Sap2000 Yapı Modeli (6 Katlı)	41
Şekil 3.4. Sap2000 Yapı Modeli (9 Katlı)	42
Şekil 3.5. Deprem ivme kayıtlarına ait %5 sönümlü ivme (a) ve deplasman spektrumları (b).....	44
Şekil 3.6. Deprem ivme kayıtlarına ait %5 sönümlü enerji spektrumları	44
Şekil 3.7. Gri kurt sürünün aşağıdan yukarı doğru artan liderlik hiyerarşisi.	45
Şekil 3.8. Gri kurtların avlana davranışları: (A) av peşinde koşmak, yaklaşmak ve izlemek (B – D) takip etmek, taciz etmek ve çevrelemek (E) durağan durum ve saldırı.....	46
Şekil 3.9. Alfa, beta, delta ve omega kurtlarının ava yaklaşmasının grafiksel gösterimi	47
Şekil 3.10. 2D (a) ve 3D (b) uzayında pozisyon vektörleri ve muhtemel bir sonraki pozisyonları.....	48
Şekil 3.11. GWO'da sürü bireylerinin pozisyonlarının güncellemesi	49
Şekil 3.12. Sap2000 Programında Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlerin Parametrelerinin Girilmesi	52

Şekil 3.13. İzolatör Tasarımı Akış Diyagramı.....	53
Şekil 3.14. Sismik izolasyon sistemlerinin parametrelerinin GWO ile enerji esaslı optimizasyonu akış şeması	55
Şekil 4.1. $D_y=0.01$ m (a) ve $D_y=0.025$ m (b) akma deplasmanına göre örnek modellerin efektif rijitlik değeri	56
Şekil 4.2. Giren enerji ile deplasman karşılaştırmaları	58
Şekil 4.3. Giren enerji ve ivme karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.4. Giren enerji ile sönüm karşılaştırılması	60
Şekil 4.5. Giren enerji ile taban kesme karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.6. Katlara göre yapı tepkilerinin karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.7. Depremlere göre giren enerjinin kütleyle oranı	64
Şekil 4.8. Depremlere göre deplasmanların karşılaştırılması	65
Şekil 4.9. Depremlere göre ivmelerin karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.10. Depremlere göre sismik izolasyon sisteminin sönümlerin karşılaştırılması.....	68
Şekil 4.11. Depremlere göre taban kesmenin karşılaştırılması	69
Şekil 4.12. İzolasyon parametrelerinin optimum sonucunu bulmak için önerilen yöntemin örnek uygulaması.....	71
Şekil 4.13. Depremlerin 3 katlı örnek yapı üzerindeki giren enerji diyagramları	73
Şekil 4.14. Deprem ivme kayıtlarına göre optimum izolasyon parametreleri ile belirlenen kuvvet deplasman eğrileri.....	75
Şekil 4.15. 3, 6 ve 9 katlı yapının GWO algoritması ile E_i/m oranının yaklaşım eğrisi.....	77
Şekil 4.16. Ankastre, grafik yöntem ve GWO için ivme ve deplasman karşılaştırmaları	78

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

F	: Maksimum Kuvveti
F_q	: İzolatör Karakteristik Dayanımı
D	: İzolatör Yatay Deplasmanı
T₀	: Eşdeğer İzolasyon Periyodu
m	: Yapı Toplam Kütlesi
Q	: İzolatör Karakteristik Dayanımı
k₂	: Akma Sonrası Rijitlik
k₁	: Akma Öncesi Rijitlik
R	: Akma Sonrası Rijitliğin Akma Öncesi Rijitliğe Oranı (k_2/k_1)
F_y	: İzolatörün Akma Kuvvet Değeri
D_y	: İzolatörün Akma Deplasmanı
G₁	: Kurşunun Kayma Modülü
A₁	: Kurşunun Kesit Alanını
G_r	: Kauçuğun Kayma Modülü
A_r	: Kauçuğun Kesit Alanı
h_r	: Kauçuk Yüksekliği
k_e	: Efektif Rijitlik
E_i	: Giren Enerji
E_m	: Kütleye Bağlı Kinetik Enerjiyi
E_c	: Viskoz Sönümleme Enerjisini
E_k	: Sistemin Rijitliğine Bağlı Yay Enerjisini
E_h	: Histeretik Enerji
E_{se}	: Elastik Şekil Değiştirmeye Bağlı Enerji

S_v	: Belirli Bir Sönüm Oranında Sözde Spektral Hız
W	: Ağırlık
T_{eff}	: Efektif İzolasyon Periyodu
β_{eff}	: Eşdeğer Sönüm Oranı
Q/W	: Karakteristik Dayanımın Ağırlığa Oranı
g	: Yer Çekimi İvmesi
cm	: Santimetre
sn	: Saniye
km	: Kilometre
kN	: Kilonewton
a	: İvme
GWO	: Gri Kurt Optimizasyon Algoritması
SD	: Spektral Deplasman
SA	: Spektral İvme
OAPI	: Açık Uygulama Arayüzü
API	: Uygulama Programlama Arayüzü
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
PEER	: Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi
PGA	: Pik Yer İvmesi
PGV	: Pik Yer Hızı
PGD	: Pik Yer Değiştirme
PRA	: Pik Çatı Katı İvmesi
PSA	: Pik Üst Yapı İvmesi
R_{jb}	: Faya Uzaklık

M_w	: Deprem Büyüklüğü
ZC	: Orta Sertlikteki Zemin Sınıfı
ZD	: Zayıf Zemin Sınıfı
LDRB	: Düşük Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet Sistemleri
HDNR	: Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet Sistemleri



1. GİRİŞ

Depremeler dünyanın her yerinde görülebilen yapılar için büyük yıkıcı sonuçları olan yer hareketleridir. Belirli periyotlarla meydana gelen bu depremler ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Bu can ve mal kayıplarının asıl sebebi deprem değil depreme dayanıklı olmayan yapılardır. Yapıların depreme dayanıklı olarak yapılması fikri bu sebeple ortaya çıkmıştır. Bu amaçla depreme dayanıklı yapı tasarımı belirli kurallar çerçevesinde geliştirilmeye devam etmektedir.

Ekonomik ölçüler doğrultusunda deprem etkisi altında kalan binalar için depreme dayanabilmesi adına farklı çözüm yöntemleri mevcuttur. Konvansiyonel yapılarda büyük deprem kuvvetlerinin etkisiyle yapının taşıyıcı sistemi elastik deplasman limitlerine ve hatta plastik deformasyona maruz kalmaktadır. Deprem etkileri altında her yapının elastik şekil değiştirme sınırlarında kalacak şekilde tasarlanması ekonomik olarak mümkün değildir. Yapıya gelen yükün düzgün dağıtılması ve istenilen deplasmanların yapılabilmesi gerekir. Düşük deprem yükü etki eden yapılarda elastik şekil değişikliği beklenirken yüksek deprem yükü etki eden yapılarda taşıyıcı elemanların plastik şekil değişikliği yaparak yapının yıkılmaması ve bu durumda da yapının tahliyesini mümkün kılması beklenir. Bu tür tasarımlarda yapının süneklik koşuluna uyulması gerekir. Süneklik bir malzemenin plastik deformasyonunu sürdürebilme kapasitesi olarak tanımlanır. Bu sayede elastik kısmın ötesine geçilerek plastik kapasitenin kullanılması sağlanır. Dünya genelinde uygulanan yönetmelikler bu tasarım yöntemini baz almaktadır. Bu tür yapıların, göçme gerçekleşmeden belirli bir miktarda hasar almasına olanak tanınması, kontrollü hasar yaklaşımını temsil eder. Elastik dışı tasarımda kontrollü hasara izin verilebilmesi için depremin oluşma olasılığı da dikkate alınmalıdır. Hasara bağlı olarak hesap sonuçlarını da dahil ederek performansa dayalı deprem mühendisliği olarak adlandırılır.

Deprem sırasında yapıya iletilen yüksek enerjinin taşıyıcı elemanlara dağıtılarak bu elemanlar tarafından sönmülenmesi, performansa dayalı tasarım olarak adlandırılabilir. Performansa dayalı tasarımda yapıya gelen enerji; kinetik enerji, potansiyel enerji, sönmüleme enerjisi, elastik enerji ve histeretik enerji olarak yapı tarafından karşılanmayı amaçlar. Burada kinetik enerji ve sönmüleyici enerji deprem yükünü karşılayamazsa yapı şekil değiştirerek histeretik enerji ile bertaraf etmeye çalışır. Bu da yetersiz kalırsa göçme gerçekleşir. Bu hasar düzeyi, yapı tasarımı ve ek sönmüleyiciler kullanılarak kontrol altına alınabilir.

Günümüzde genelde toplu kullanım alanları, deprem sonrasında acil kullanılması gereken yapılar ya da köprü ve viyadük gibi yapılarda ek sönümleyiciler daha çok kullanılmaktadır.

Konvansiyonel yapılarda, sabit rijitlik ve deprem ivmesi altında karşılayamayacağı deplasmanları yapıya sismik izolatör ekleyerek karşılamayı amaçlaması sonucu yapılarda sismik izolatör kullanılması fikri doğmuştur.

Sismik izolatörlerin tarihçesi, 1870'lere uzanmaktadır. İlk olarak San Francisco'da, çift konkav yuvarlanma bilyeli yatak sistemi ile "deprem geçirmez" bir yapı oluşturulması önerilmiştir. Bu sistem, modern Friction Pendulum® tipi izolatörlere benzerdir ve sismik izolasyonun temelini oluşturur (Warn & Ryan, 2012). Bu öneri, izolatörlerin modern mimaride uygulanması için önemli bir adım olmuştur. İlk büyük ölçekli sismik izolasyon uygulaması ise 1985 yılında Kaliforniya'da, Rancho Cucamonga'da Foothill Communities Law and Justice Center yapısında gerçekleştirilmiştir. Bu bina, 98 adet yüksek sönümleyici doğal kauçuk izolatör üzerinde inşa edilmiştir (Warn & Ryan, 2012). Sismik izolasyonun modern dönemde gelişmesine katkı sağlayan önemli araştırmacılar arasında James M. Kelly ve Farzad Naeim yer almaktadır. James M. Kelly, özellikle kauçuk izolatörler üzerine yaptığı çalışmalarla bilinmektedir. Farzad Naeim ise hem teorik hem de pratik uygulamalarda sismik izolasyonun gelişimine önemli katkılar sunmuştur (Naeim & Kelly, 1999). Bu araştırmacılar, sismik izolasyon sistemlerinin hem teorik çerçevesini oluşturmuş hem de bu teknolojinin daha geniş bir alanda benimsenmesini sağlamıştır.

Symans ve Warn, sismik korunma için yarı aktif kontrol sistemlerinin etkisini incelerken birçok önemli bulguya ulaşmışlardır. Özellikle, sismik izolatörlerin enerji sönümleme kapasiteleri, farklı titreşim frekanslarına verdikleri tepkiler ve yapısal güvenlik üzerindeki olumlu etkileri detaylandırılmıştır. Symans ve ekibi, yarı aktif kontrol sistemlerinin yalnızca enerji sönümleme oranını artırmakla kalmayıp aynı zamanda yapıların deformasyon seviyelerini de azaltmada etkili olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, bu sistemlerin düşük enerji gereksinimiyle çalışabilmesi, maliyet etkinliği ve geniş ölçekli yapılarda uygulanabilirliği gibi avantajları öne çıkarılmıştır (Symans M. D., 1999).

Yapı tasarımında enerji kavramının da bir çözüm yöntemi olarak kullanılması ilk kez Housner (1956) tarafından önerilmiştir. Enerji esaslı depreme dayanıklı yapı tasarımı, yapının elastik ve elastik ötesi davranışlarında tüketileceği toplam enerjinin, deprem sırasında yapıya aktarılan enerjiyle karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımda, temel amaç, deprem

sırasında yapıya giren enerjinin yapı içerisinde tüketilmesi ve yapı elemanlarında hasar oluşmadan göçmenin önlenmesi için gerekli önlemlerin alınmasıdır.

Deprem sırasında yapıya giren enerji; sistemin kinetik enerjisi, sönüm enerjisi, elastik şekil değiştirme enerjisi ve histeretik enerjilerin toplamı olarak tanımlanır. Bu toplam enerjinin küçük bir kısmı kinetik enerji ve elastik şekil değiştirme enerjisi olarak depolanırken, büyük bir kısmı ise sönüm ve yapının histeretik davranışı ile tüketilir. Özellikle, yapının sönüm kapasitesi ve doğrusal olmayan davranışına bağlı olarak, sistemin tükettiği enerji büyük oranda histeretik enerji şeklinde ortaya çıkar.

Sismik izolatörler, yapı temeline yerleştirilerek, yapının temel frekansını depremin tehlikeli frekans aralığının dışına kaydırmakta ve böylece yapının performansını artırmaktadır. Bu yöntem, yapıların yüksek yer ivmelerine karşı korunmasını sağlamak ve üst yapıda oluşabilecek titreşimleri minimize etmektedir. Alhan ve Sürmeli'nin (2011) çalışmasında, sismik izolatörler kullanılarak yapılan tasarımlarda, özellikle katlar arası öteleme ve hızlanmaların azaltılmasıyla yapıların performanslarının arttığı ve yapısal elemanların hasar görme olasılığının düştüğü belirtilmiştir (Alhan & Sürmeli, 2011).

Taşıma gücü bazlı tasarım, yapının veya bileşenlerinin, üzerlerine gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek kapasitede olmasını sağlamayı amaçlar. Özellikle sismik olaylar sırasında taşıyıcı elemanların güvenliğini korumak adına, tasarımda maksimum yük dayanımı önceliklidir. Bu bağlamda, elastomerik veya kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler gibi izolatör sistemleri de deprem anında büyük eksenel yükler ve yatay deplasmanlara maruz kaldığından, kritik taşıma kapasiteleri dikkatlice değerlendirilir. Mevcut yöntemler, belirli bir yatay yer değiştirmede izolatörlerin stabilitesini koruyacak şekilde kapasite sınırlarının hesaplanmasını önermektedir (Weisman & Warn, 2012).

Şekil değiştirme bazlı tasarım, yapı elemanlarının ve sismik izolatörlerin deprem sırasında maruz kalacakları deformasyonları sınırlayarak güvenli performans göstermesini hedefler. Bu tasarım yaklaşımında, özellikle izolatörlerin yatay yer değiştirme kapasitesi kritik bir rol oynar; bu kapasitenin aşılması durumunda stabilite sorunları ortaya çıkabilir. Zhong ve arkadaşlarının (2022) çalışmasında, izolasyon tabakasındaki aşırı yatay yer değiştirmelerin binanın izolasyon çukuru duvarlarıyla çarpışmasına yol açabileceği ve bu durumun yapısal bütünlüğü tehlikeye atabileceği belirtilmiştir. Çalışmada, bu riski azaltmak amacıyla bir pasif tampon cihazı geliştirilmiş ve yatay yer değiştirmeyi sınırlayarak sismik güvenliği artırmak için başarılı bir yöntem olduğu gösterilmiştir (Zhong, Liu, Mercan, & Zhou, 2022).

Enerji bazlı tasarım, yapıların depreme dayanıklılığını sağlamak için, yapı üzerindeki sismik yükleri ve deprem enerjisini göz önünde bulunduran bir tasarım yaklaşımıdır. Bu yöntem, yapının deprem anında absorbe ettiği ve dağıttığı enerjiyi hesaplayarak, yapısal elemanların bu enerjiye dayanacak şekilde tasarlanmasını amaçlar. Geleneksel kuvvet bazlı tasarım yöntemleri, yapıya etki eden yükleri göz önüne alırken, enerji bazlı tasarım depremin doğrudan yapı içinde oluşturduğu enerji taleplerine odaklanır (Xinzheng, 2012).

Enerji bazlı tasarımda ana hedef, giren enerjiyi doğru bir şekilde hesaplamak ve bu enerjinin ne kadarının yapı tarafından emileceğini belirlemektir. Giren enerji, yapı tarafından absorbe edilen kinetik, elastik gerilme, sönümleyici ve histeretik enerji bileşenlerinden oluşur. Bu bileşenler, deprem sırasında yapıya aktarılan enerjinin nasıl dağıtıldığını açıklar. Enerji bazlı tasarımda özellikle histeretik enerji kritik bir bileşendir; bu enerji, yapının kalıcı şekil değiştirmesiyle ilişkilidir ve deprem sırasında oluşan hasarın bir göstergesi olarak kabul edilir. Bu yaklaşım, giren enerjinin yapıya nasıl dağıldığını incelemek için enerjinin farklı bileşenleri üzerinden analizler yapmayı içerir. Özellikle, enerji bazlı tasarımda en önemli faktörlerden biri olan histeretik enerji, depreme bağlı hasarı ölçmede kritik bir rol oynar. Bu durum, yapının plastik deformasyon kapasitesine göre enerji taleplerini karşılamasına olanak tanır (Decanini & Mollaioli, 2001)

Bu yaklaşımda genellikle nonlinear zaman tanım alanı analizleri kullanılarak yapı üzerindeki enerji talepleri simüle edilir. Bu analizler, yapının deprem anındaki deformasyon ve enerji tüketim kapasitelerini daha doğru bir şekilde belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, enerji taleplerinin belirli bir seviyede tutulabilmesi için yapının rijitlik, süneklik ve sönümleme özellikleri optimize edilerek, yapıların hasar almasını önleyen tasarım stratejileri geliştirilir. Enerji bazlı tasarım, özellikle yüksek sünekliğe sahip yapı sistemlerinde, enerji dağılımını etkin şekilde kontrol ederek yapısal hasarın önlenmesini sağlar (Lie-pin, 2014).

Histeretik enerji, yapısal hasarın belirlenmesinde önemli bir rol oynar ve toplam giren enerjinin bir oranı olarak ifade edilir. Yapısal hasar, genellikle sistemin histeretik enerji tüketimi ile ilişkilendirilir. Bu enerji oranı, sistemin rijitliğinde artış veya süneklik kaybı yaşandıkça azalır, bu da yapının davranış özelliklerine bağlı olarak enerji tüketim kapasitesini etkiler (Shen & Liu, 2009).

1.1. Amaç ve Kapsam

Literatürde, depreme dayanıklı yapı tasarımında çelik yapıların, betonarme yapılarla kıyasla yüksek süneklik ve mukavemet özellikleri sayesinde yaygın olarak tercih edildiği

gözlemlenmektedir. Betonarme yapılarda, deprem etkisi altında gevrek kırılma riski ve çatlak oluşumu gibi sorunlar sıkça karşılaşılabılırken, çelik yapılar sünek davranış sergileyerek deprem sırasında enerjiyi daha etkili bir şekilde absorbe eder ve büyük deformasyonlara dayanabilir. Çeliğin elastik sınırları aştığında dahi şekil değiştirme kabiliyeti sayesinde, yapıların ciddi hasar almadan deprem yüklerini karşılamasına olanak tanır. Ayrıca, betonun heterojen yapısı ve gevrek davranışı nedeniyle hesaplamaların karmaşıklığı da çelik yapılarda daha kolay ve net bir hale gelir. Çelik yapılardaki bu avantajlara rağmen, depremin yapı üzerindeki etkilerini daha da azaltmak amacıyla sismik izolatörlerin kullanımı giderek artmaktadır.

Sismik izolatörler arasında, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, deprem sırasında yatay hareketlere karşı dayanıklılığı artırması ve enerji sönümleme kapasitesini yükseltmesi nedeniyle öne çıkar. Kurşun çekirdek, büyük yatay yer değiştirmeler altında enerjiyi plastik deformasyonla emerken, kauçuk kısım yapıya esneklik kazandırarak sismik etkileri üst yapılara daha az iletir. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin bu iki bileşeni, deprem enerjisini etkili bir şekilde yönetmelerini sağlar. Literatürde, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve benzeri izolatörlerin yapı üzerindeki etkileri üzerine birçok çalışma yapılmış; ancak izolatör parametrelerinin enerji bazlı bir perspektiften nasıl bir rol oynadığı sınırlı sayıda araştırmada ele alınmıştır.

Mevcut araştırmalar, yapıların deprem etkisi altında nasıl davrandığını doğrusal olmayan analizler ve zaman tanım alanı analizleriyle ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Bu analiz yöntemleri, özellikle yapının elastik sınırlarının ötesinde, plastik deformasyonlara ve enerji tüketimine odaklanarak deprem yüklerinin yapı üzerindeki etkilerini daha doğru bir şekilde modellememize olanak tanır. Ancak, bu çalışmalar genellikle deplasman ve kat ötelenmesi gibi parametreler üzerine odaklanmakta, enerji dağılımı ve enerji bileşenlerinin izolatör özelliklerine bağlı olarak nasıl değiştiği konusunda sınırlı bilgi sunmaktadır. Bu nedenle, sismik izolatörlerin yapı üzerindeki enerji dağılımını nasıl etkilediği konusunda daha derinlemesine araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, enerji bazlı tasarım kapsamında yapıya giren enerjinin izolatör parametreleri (örneğin rijitlik, akma dayanımı ve rijitlik oranı gibi), deprem büyüklüğü ve yapı kat sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği ayrıntılı bir şekilde analiz edilecektir. Farklı büyüklükteki depremler altında enerji dağılımındaki değişiklikler, çelik yapı modelleri üzerinde değerlendirilecek ve kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanımı ile bu enerjinin üst yapı tepkilerindeki değişim karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Bu inceleme, 4200 adet zaman

tanım alanında yapılan analizler ve bunlara bağılı olarak hesaplanan ortalama değerler üzerinden gerçekleştirilecektir. Bu sayıdaki analizi yapmak ve yapı tepkilerini incelemek amacı ile analizlerde, SAP2000 Version 24.0.0 ve MATLAB (R2021b) OAPI gibi mühendislik yazılımları kullanılacaktır. Ayrıca bu yazılımlar kullanılarak hazırlanacak sonuçlardan yapı için en uygun izolasyon sistemleri belirlemek için grafik bir yöntem önerilecektir (Computers and Structures, 2020), (The MathWorks Inc, 2022) Bu grafik yöntemde, izolatör deplasmanı ve sönüm kısıtları kullanılarak grafikler oluşturulmuş, bu grafikler üst üste çakıştırılarak kısıtlar içinde kalan uygun izolatör sistemleri belirlenmiştir. Belirlenen uygun özümmler içerisinde çatı katı ivmesi en düşük olan sistemin seçilmesi sağlanarak sismik izolasyon parametreleri optimize edilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise gri kurt algoritması yardımı ile izolasyon parametreleri grafik yöntemle benzer kısıtlar kullanılarak enerji esaslı optimize edilmiş, grafik yöntemle sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1.2. Literatür Araştırması

1.2.1. Enerji

Housner, düşük sönümleme kapasitesine sahip yapıların güçlü deprem hareketleri altında büyük yatay kuvvetler ve gerilmeler oluşturabileceği belirtmiştir. Ancak, elastik olmayan deformasyonların kabul edilmesi durumunda, yapıların daha düşük tasarım yükleriyle güvenli bir şekilde tasarlanabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda, kaydedilmiş deprem hareketleri üzerinden giren enerjiye dayalı bir sınır tasarım yöntemi önermiştir. Bu yöntem, yüksek su tankları gibi yapı türlerine uygulandığında, tamamen elastik tasarımın gerektirdiği yüksek kuvvetler yerine, belirli bölgelerde plastik deformasyona izin vererek daha düşük yatay kuvvetlerle güvenli tasarım yapılabileceğini göstermektedir. Tamamen elastik bir yapı 0.4g büyüklüğünde bir yatay ivmeye maruz kaldığında, yapısal elemanlarda önemli gerilmeler meydana gelir. Ancak sünek tasarım ilkelerine göre belirli bölgelerde plastikleşmeye izin verildiğinde, bu yapı daha düşük bir tasarım ivmesiyle (örneğin 0.125g gibi) güvenli bir şekilde tasarlanabilir. Housner, sismik enerji tasarımında giren enerjinin bir kısmının yapısal sönümleme ve doğrusal olmayan davranış ile dağıtıldığını, geri kalan kısmının ise kinetik ve elastik şekil değiştirme enerjisi olarak depolandığını belirtmiştir. Bu enerji esaslı yaklaşımla, günümüz yapısal kontrol yöntemlerinin temelini oluşturmuştur (Housner, 1956).

McKevitt ve arkadaşları, deprem etkisi altındaki yapıların enerji tüketimine dayalı bir analiz yöntemini önermiştir. Tezde, yapıların sönümleme kapasitelerinin ve histeretik enerji tüketiminin tasarımda nasıl dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır. Tek serbestlik dereceli

sistemler üzerinde parametrik bir çalışma yaparak, giren enerjinin viskoz ve histeretik sönümlleme mekanizmaları ile nasıl dağıldığını analiz etmiş ve bu bulguları çok serbestlik dereceli sistemlere genişletmiştir. Hesaplamalarında, sistem dayanımının ve sönümlleme özelliklerinin enerji dağılımına etkilerini incelemiş, sonuçlar enerji spektrumları aracılığıyla yapının elastik olmayan deformasyonlarla enerjiyi nasıl dağıttığını ortaya koymuştur. (McKevitt, Fisher, & Buckle, 1980).

Uang ve Bertero tarafından yapılan çalışmada, yapıların sismik enerji taleplerinin değerlendirilmesi incelenmiştir. Tek serbestlik dereceli sistemler üzerinde yapılan analizlerde, mutlak ve göreceli enerji formülleri karşılaştırılmıştır. Mutlak enerji formülleri, yapının tüm sismik etkiler altında maruz kaldığı toplam enerjiyi hesaba katar. Bu formüller, kütlenin ivme ile etkileşiminden doğan kinetik enerjiyi ve yapının sönümlleme kapasitesini birlikte değerlendirir. Göreceli enerji formülleri ise yapının temelindeki hareket ile karşılaştırıldığında, yapının yer değiştirmeye bağlı olarak nasıl enerji tükettiğini inceler. Mutlak enerji denkleminin fiziksel olarak daha anlamlı olduğu ve özellikle kısa ve uzun periyot aralıklarında göreceli enerji denklemlerinden önemli ölçüde farklı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, analitik olarak öngörülen mutlak enerji taleplerinin, deneysel olarak ölçülen enerji ile iyi bir uyum içinde olduğu ortaya konmuştur. Bu bulgular, yapının depreme dayanıklı tasarımında enerji taleplerini doğru bir şekilde tahmin etmeyi amaçlayan yöntemlerin güvenilirliğini arttırdığını göstermektedir. (Uang & Bertero, 1990).

Yu çalışmasında enerji tabanlı sismik tasarım yöntemlerinin gelişimini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışma, enerji yönteminin konseptini, prensiplerini ve enerji denklemlerinin oluşumunu, toplam giren enerji ile yapıların tepki enerjisini etkileyen faktörleri tartışmaktadır. Enerji yönteminin geleneksel yapılar, sismik izolasyon sistemleri ve enerji sönümleyici yapılar üzerindeki kullanımı ele alınmıştır. Ayrıca, enerji yönteminin uygulanması için karşılaşılan zorluklar ve gelecekteki araştırma yönleri vurgulanmıştır (Yu, 1999).

Sütçü tarafından yapılan çalışmada, pasif ve aktif kontrol sistemlerinin bir arada kullanıldığı bir enerji bazlı tasarım sistemi incelenmiştir. Deprem etkisi altında, yer değiştirme kontrol cihazı ve viskoz damperlerin bir kombinasyonu önerilmiştir. Yapıya giren enerjiyi etkin bir şekilde sönümlemek ve yapıdaki yer değiştirmeyi kontrol altına alarak katlar arasında eşit süneklik dağılımı sağlamayı amaçlayan çalışmada, yapının deprem enerjisini nasıl daha verimli bir şekilde yönettiği analiz edilmiştir. Viskoz damperler, yapının yer değiştirme taleplerini hedeflenen süneklik değerleri içinde tutmak için tasarlanmıştır. Damper tasarımı, enerji bazlı bir yaklaşımla ele alınmış ve yapılan analizlerde gerekli viskoz sönümlleme katsayısının

hesaplanmasıyla çok katlı yapılarda yer değiştirme tepkisinin %30-40 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, pasif ve aktif kontrol sistemlerinin bir arada kullanılmasıyla, deprem sırasında yapıya giren enerjinin büyük kısmının viskoz damperler ve yer değiştirme kontrol cihazları tarafından sönmüldüğünü göstermiştir. Bu enerji yönetimi, yapının deforme olmasını ve hasar görmesini önemli ölçüde azaltarak daha güvenli bir sismik performans sağlamıştır. Bu bulgular, yapıların depreme dayanıklılığını artırma ve enerji yönetimini optimize etme konusunda önemli katkılar sunmaktadır (Sutcu, 2006).

Enerji esaslı sismik tasarım yöntemine ilişkin mevcut araştırma ilerlemelerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Çalışmada, yapılar için enerji dağılım mekanizmalarının kontrolünün kritik bir öneme sahip olduğu ve bu mekanizmalara bağlı enerji dağılımının yapı tasarımı üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Enerji bazlı tasarımın çerçevesi, çelik takviyeli çerçeveler, betonarme çerçeve yapılar ve betonarme çerçeve-şev duvar yapıları gibi farklı yapısal sistemler için önerilmiştir. Bu çerçeve kapsamında, enerjiyi yayma kapasitelerinin tasarıma entegre edilmesi sağlanarak uygulamalı bir tasarım örneği sunulmuştur (Lie-pin, 2014).

Arcan Yanık tarafından yapılan çalışmada, çok katlı katlar arası ötelenme etkisi dikkate alınarak modellenen binalarda deprem etkisi altında yapıya giren enerjinin dağılımı incelenmiştir. Çalışmada, aktif ve pasif kontrol yöntemleri kullanılarak binalarda meydana gelen enerji dağılımları analiz edilmiştir. Yedi farklı kontrol durumu ve çeşitli deprem senaryoları kullanılarak, yapısal kontrol sistemlerinin enerji sönmüleme ve yapının güvenliğini artırma performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Pasif kontrol sistemleri olarak taban izolasyonu ve pasif kütle sönmüleyicileri, aktif kontrol olarak ise aktif kütle sönmüleyicileri uygulanmıştır. Ayrıca hem pasif hem de aktif kontrol sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrid kontrol durumu da incelenmiştir. Aktif kontrol sistemlerinin pasif kontrollere kıyasla daha etkin olduğu ve yapıya giren enerjiyi önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Yanık, 2014).

Hiraki ve arkadaşlarının (2017) çalışması, sismik izolasyon sistemlerinde mekanik enerji dengesini değerlendirmek için bir analiz yöntemi önermektedir. Çalışma, elastomer yataklarının büyük deformasyon altında sertleşme ya da kırılma gibi nihai davranışlarını incelemek için bir enerji geçiş şeması geliştirmiştir. Bu yöntem, deneysel verilerden yola çıkarak izolasyon katmanındaki mekanik enerji geçişini hesaplar ve doğrusal olmayan geri çağırma kuvvetlerini modellemek için Duffing osilatörü (doğrusal olmayan bir osilatör modeli)

gibi modeller kullanır. Analiz sonuçları, bu yaklaşımın büyük taban izole edilmiş numunelere başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir (Hiraki, Kanazawa, & Kitamura, 2017)

Enerji temelli tasarım yaklaşımıyla betonarme çerçeve sistemleri için deprem taban kesme kuvvetinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Çalışmada, küresel göçme mekanizması ve azaltılmış histeretik davranış göz önünde bulundurularak, iş-enerji prensibine dayalı bir doğrusal olmayan statik analiz yöntemi önerilmektedir. Enerji dengesi eşitliği, elastik titreşim enerjisi, plastik şekil değiştirme enerjisi ve sismik giriş enerjisini içerecek şekilde oluşturulmuştur. Deprem enerjisi, sönüm oranı ve süneklik faktörlerine bağlı olarak modifiye edilmiş yapıdaki hasara neden olan enerji hesaplanmıştır. Betonarme çerçeve elemanların histeretik enerji kaybının azaltılması amacıyla plastik enerji modifikasyon faktörü kullanılmıştır. Çalışmada, belirlenen göçme mekanizmasına göre enerji dengesi eşitliği oluşturularak, literatürdeki çeşitli modifikasyon faktörleri dikkate alınmıştır. Deprem Yönetmeliği'ne göre kat seviyelerine dağıtılan tasarım yatay yükleri ile yapılan dış iş hesaplamaları, enerji bazlı temel kesme kuvveti değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çeşitli çerçeve sistemler için hesaplanan enerji bazlı temel kesme kuvvetleri, doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleriyle elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve bazı enerji bazlı yöntemlerin bu analizlerle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuç olarak, enerji tabanlı tasarım yönteminin, betonarme çerçeve yapıların sismik davranışını anlamada ve tasarımda güvenilir bir yaklaşım sunduğu ortaya konulmuştur (Merter & Ucar, 2017).

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin uzun periyotlu ve güçlü depremler altındaki davranışı incelenen Abrar'ın yaptığı çalışmada, izolatörlerin periyotları uzatılarak yapı performansı değerlendirilmiştir. Hastane, okul ve müze gibi önemli binaların depremlere karşı güvenliğini artırmayı hedefleyen araştırmada, mevcut 4 saniyelik izolatör periyodunun 6 saniyeye çıkarılmasıyla daha güvenli bir yapı modeli geliştirilmiştir. Yapı modeli üzerinde, 1999 Düzce, 1995 Kobe ve 2010 El Mayor gibi uzun periyotlu ve güçlü depremlerin etkileri kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, yüksek periyotlarda izolatörlerin daha fazla enerji sönümleyerek yapıların deprem karşısında daha güvenli bir davranış sergilediği ve bu sistemin özellikle uzun periyotlu depremler için önerilebileceği gösterilmiştir (Abrar, 2018).

Yapılan çalışmada elastik tek serbestlik dereceli sistemler için maksimum deprem giriş enerjisinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Geleneksel kuvvet ve deplasman tabanlı sismik tasarım yaklaşımlarının ötesinde, enerji tabanlı tasarım metodolojilerinin daha kapsamlı ve güvenilir olduğu vurgulanmaktadır. Çalışmada, Pasifik Deprem Araştırma Merkezi (PEER) veri tabanından seçilen 100 yer hareketi kaydı kullanılarak doğrusal elastik sistemlerin

maksimum deprem giriş enerjileri hesaplanmıştır. Çeşitli doğal periyotlar ve sabit sönüm oranları için yapılan 3000'den fazla zaman tanım alanı analizi sonucunda, kütle normalize edilmiş maksimum deprem giriş enerjisi değerleri belirlenmiştir. Önceki araştırmacıların yöntemleri ile karşılaştırmalar yapılmış ve spektral hızı esas alan yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Analiz sonuçları, önerilen yöntemin zaman tanım alanı analizleriyle büyük ölçüde uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, maksimum deprem giriş enerjisinin elastik tek serbestlik dereceli sistemler için nispeten kararlı bir parametre olduğu ve sismik tasarım ile değerlendirme süreçlerinde güvenilir bir gösterge olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur (Merter, 2019).

Dedeoğlu ve Calayır (2021) tarafından yapılan çalışmada, enerji esaslı tasarım yaklaşımıyla tek serbestlik dereceli sistemlerin, farklı zemin sınıflarına göre ölçeklenmiş deprem ivme kayıtları altındaki davranışları analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) yönetmeliklerinin zemin sınıflarına göre ölçeklenmiş ivme kayıtları ile yapılan doğrusal olmayan dinamik analizler sonucunda yapıların yer değiştirme, kesme kuvveti ve enerji girdileri karşılaştırılmıştır. Özellikle enerji terimleri kinetik, sönüm, elastik şekil değiştirme ve histeretik enerji bileşenleri üzerinden değerlendirilmiş ve tasarım spektrumlarına bağlı değişiklikler tartışılmıştır. Analiz sonuçları, zemin sınıfı ve deprem karakteristiklerine bağlı olarak enerji girdilerinin önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir (Dedeoğlu & Calayır, 2021).

Gholami ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bu derleme çalışması, enerji esaslı sismik tasarım yöntemleri üzerine gerçekleştirilen araştırmaları kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışma, enerjinin yapıların tasarımında temel bir kriter olarak kullanılmasının, geleneksel kuvvet ve yer değiştirme esaslı yöntemlere kıyasla daha gerçekçi olduğu savunulmaktadır. Depremi yapıya enerji uyguladığı ve bu enerjinin yapı tarafından emilmesi ve dağıtılması gerektiği varsayımı temel alınmıştır. Çalışmada, enerji tabanlı tasarım yöntemlerinin teorik çerçevesi, enerji dengesi konsepti, enerji talebinin belirlenmesi ve kapasite ile ilgili kritik konular ele alınmıştır. Bununla birlikte, bu yöntemin uygulamaya geçmesi için eksik kriterlerin tamamlanması gerektiği vurgulanmıştır (Gholami, Garivani, & Askariani, 2022).

Çok katlı betonarme çerçeve yapıların deprem davranışının enerji esaslı yöntemlerle değerlendirilmesi amaçlanan Dedeoğlu'nun yaptığı çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'e göre tasarlanmış 3, 6, 9 ve 12 katlı betonarme yapılar üzerinde enerji

esaslı analizler yapılmıştır. Yapılar, göçme noktasına kadar statik itme analizine tabi tutulmuş ve bu analizler sonucunda plastik enerji-tepe yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca, seçili depremlerin ivme kayıtları kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, depremelerin yapılardan talep ettiği plastik enerji değerleri ile yapıların enerji kapasitesi karşılaştırılmış ve hedef yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, az katlı betonarme çerçeve yapıların deprem davranışlarının enerji esaslı yöntemlerle güvenilir bir şekilde değerlendirilebileceği tespit edilmiştir. (Dedeoğlu, 2023).

Özen'in yaptığı çalışmada, enerji sönümleyici sistemlerle donatılmış sabit mesnetli ve sallanan tabanlı bina çerçevelerinin deprem performansları karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Sabit mesnetli ve art germe şeritleri ile donatılmış serbest salınlı sistemlerin etkileri incelenmiş, perde duvarlı betonarme bir bina modeli tasarlanmış ve ETABS yazılımında analiz edilmiştir. Çalışmada doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiş ve yapılar Kaliforniya bölgesinden alınan yer hareketlerine maruz bırakılmıştır. Kat yüksekliği, açıklık sayısı, perde duvar varlığı ve damper eklenmesi gibi parametreler analiz edilmiştir. Sonuç olarak, sallanan tabanlı sistemlerin deprem etkilerini azaltmada sabit mesnetli sistemlere göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir. (Özen, 2023).

Demir (2023) çalışmasında, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 yönetmeliğiyle uyumlu gerçek ivme kayıtlarının tek serbestlik dereceli sistemlere giren enerji üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, farklı tasarım spektrumlarıyla uyumlu toplamda 48 ivme kaydı seti kullanılarak, 72 farklı tek serbestlik dereceli sistem üzerinde doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, tasarım spektrumlarına uyumlu farklı ivme kayıt setlerinden elde edilen maksimum giren enerji değerlerinin benzer olduğunu göstermektedir. Ayrıca, enerji taleplerinin yerel zemin sınıfına bağlı olarak arttığı ve tasarım spektrumu değişikliklerinin enerji talebini önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir (Demir, 2023).

Dedeoğlu ve Calayır (2024) tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'de meydana gelen depremler ışığında ZC ve ZD zemin sınıflarına ait yapı sistemleri için elastik giren enerji spektrumları geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, ölçeklenmiş deprem ivme kayıtları kullanılarak elastik tek serbestlik dereceli sistemlerin zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerle zemin sınıflarına özgü ortalama giren enerji spektrumları oluşturulmuştur. Bu spektrumlar, enerji bazlı tasarım süreçlerinde maksimum giren enerjiyi pratik bir şekilde tahmin etmek için kullanılabilir. Analiz sonuçları, önerilen

spektrumların zaman tanım alanı analizleriyle elde edilen verilerle uyumlu ve tasarım açısından koruyucu olduğunu göstermektedir (Dedeoğlu & Calayır, 2024).

1.2.2. Sismik İzolatörler

İdeal bir deprem dirençli sistem, gerekli rijitliği, mukavemeti ve enerji dağıtma kapasitesini sağlamalıdır. Deprem dirençli sistemdeki deprem girdisinin oluşturulması, yapı üzerindeki taleplerin deprem ile belirlenmesi, sismik bir uyarı sırasında binaya aktarılan enerji talebinin tahmin edilmesi gibi sorunları çözmeyi hedefler. Housner, tek serbestlik dereceli bir sistemde kullanılan ve enerji bazlı depreme dayanıklı tasarım olarak adlandırılan alternatif bir tasarım yöntemi önermiştir. Tasarım yönteminde bir deprem yer hareketi süresince enerji talebinin tahmin edilebileceği ve yapının veya taşıyıcı elemanların enerji ihtiyacının belirlenebileceği fikrine dayanmaktadır. Akbaş ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tek serbestlik dereceli sistemine enerji girişini düzenleyen enerji parametreleri verilmekte ve bu parametrelerin daha iyi anlaşılması adına analitik bir çalışma yürütülmüştür (Akbaş & Shen, 2003).

İzolatör özelliklerinin sismik performans üzerindeki etkisi araştırılmış ve sürtünme sarkaç sisteminin yüksek deprem enerjisini daha verimli sönümlediği görülmüştür. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve Sürtünmeli Sarkaç Sistemi karşılaştırmalarında Sürtünmeli Sarkaç Sistemi'nin dönme etkisini daha iyi kontrol ettiği bulunmuştur (Matsagar, 2004).

Jangid tarafından yapılan çalışmada, kurşun çekirdekli izolatörlerin yakın-fay hareketleri altında optimum performans göstermesini incelemektedir. Araştırmada, çok katlı binaların kurşun çekirdekli izolatörler ile izole edilmesi durumunda bu yapıların sismik tepkileri değerlendirilmiştir. Binaların üst yapısı doğrusal bir modelle ele alınmış, kurşun çekirdekli izolatörlerin kuvvet-deformasyon davranışı ise iki doğrusal bir modelle temsil edilmiştir. Bu modelleme, izolatörlerin kayma rijitliği ve viskoz sönümlemeleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Yapılan analizlerde, izolatörün kayma rijitliğinin artırılması ile binaların üst kat ivmelerinde yaklaşık %80 oranında bir azalma sağlanırken, izolatörün yatay yer değiştirmelerinde önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Örneğin, en düşük izolatör dayanımı için yer değiştirme 42.95cm iken, dayanım arttığında bu değer 17.88 cm'ye kadar düşmüştür. Böylece, yüksek kayma dayanımına sahip izolatörlerin, yer değiştirme miktarını azaltırken, yapının sismik performansını olumsuz etkilemediği sonucuna varılmıştır (Jangid, 2007).

Farklı izolatör dağılımlarının sismik performans üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Simetrik ve asimetrik yapı modelleri üzerinde yapılan analizlerde, izolatörlerin

farklı şekillerde yerleştirilmesinin yapıların dinamik davranışını, özellikle katlar arası öteleme, taban kesme kuvveti ve yapısal deformasyon gibi kritik performans kriterlerini önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışma, asimetrik yapılarda izolatörlerin düzensiz dağılımının sismik yükler altındaki performansı olumsuz yönde etkileyebileceğini ve bu tür yapıların daha fazla deformasyona maruz kaldığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, izolatör dağılımının, özellikle asimetrik yapılarda yapı stabilitesi ve güvenliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir (Kılar & Koren, 2009).

2009 yılında Gökhan tarafından yapılan çalışmada, betonarme yapılarda izolatör kullanmanın taşıyıcı sistem üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, izolatörlerin uygulanmasıyla yapıların depreme karşı dayanıklılıklarının nasıl arttığı araştırılmıştır. SAP2000 programı ile yapılan analizlerde izolatörlerin betonarme yapılar üzerindeki faydaları test edilmiştir. Sonuçlar, izolatörlerin taşıyıcı sistemin davranışını olumlu yönde etkilediğini ve deprem anında oluşan kuvvetlerin etkisini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Taşıyıcı sistemlerde katlar arası ötelenme oranlarını %35'e kadar azalttığı ve yapısal hasarları büyük ölçüde engellediği bulunmuştur (Gökhan, 2009).

Turan'ın yaptığı çalışmada, 2011 yılında yarı aktif kontrol sistemlerinin deprem etkisi altındaki yapıların davranışlarını nasıl iyileştirdiğini incelemiştir. Üç katlı bir model yapı üzerinde yapılan deneylerde, değişken sönüm katsayısına sahip amortisörler kullanılmıştır. Araştırmada, amortisörün matematiksel modeli geliştirilmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, yarı aktif kontrol sistemlerinin deprem sırasında yapının deplasman ve hızlarını azaltarak performansı önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir (Turan & Aydın, 2011).

Sismik izolasyon sistemlerinde parametrelerdeki rastgele değişimlerin, yapı performansı üzerindeki etkisini Monte Carlo Simülasyon Metodu ile incelemeyi amaçlamaktadır. İzolatör parametrelerindeki rastgelelik, yapıların sismik performansını nasıl etkilediği ile ilişkilendirilmiştir. İzolatör rijitliği ve sönüm oranı gibi değişkenler, simülasyonlarla modellenmiş ve elde edilen sonuçlar çeşitli yer hareketleri altında test edilmiştir. Bulgular, parametrelerdeki küçük değişikliklerin bile yapısal tepkiler üzerinde önemli etkileri olduğunu ortaya koymuştur, bu da tasarım aşamasında bu değişimlerin dikkatlice göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir (Alhan & Gazi, 2013).

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör ve viskoz damperlerin düzensiz betonarme yapılardaki etkileri incelenmiştir. Yapılan analizlerde, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün

yatay deplasmanları büyük oranda azalttığı ve yapının sismik performansını artırdığı sonucuna varılmıştır (Hwang, 2013).

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin mekanik özelliklerindeki değişkenliğin sismik izolasyon sistemi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Farklı zemin hareketleri için izolatörlerin mekanik özelliklerinin sistemin tepkisini nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Bulgular, izolatörlerin mekanik özelliklerinin değişiminin, sismik performans üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ve belirli durumlarda performansı önemli ölçüde değiştirebileceğini göstermiştir (Choun, Park, & Choi, 2014).

Farklı yüksekliklerdeki binalarda kurşun çekirdekli izolatörlerin deprem etkisi altındaki performansını incelemektedir. 5, 9 ve 16 katlı binaların izolatörlü ve izolatörsüz halleri karşılaştırılarak, izolatörlerin yapısal tepkileri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. LS-DYNA yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde, izolatörlerin yapıların sismik tepkilerini azaltmada etkili olduğu ve izolatörsüz binalarda gözlemlenen hasarların izolatörlü binalarda çok daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir (Mkrtycheva, Dzhinchvelashvili, & Bunov, 2014).

Yakın-fay etkileri altında izole edilmiş asimetrik yapıların burulma ve çarpışma problemlerini incelemektedir. Ismail, burulma ve çarpışmayı ortadan kaldırmak amacıyla, teorik olarak izole edilmiş asimetrik yapıların simetrik yapılar gibi davranmasını sağlamak üzere çeşitli yöntemler araştırmıştır. Çalışmada, yakın-fay hareketleri altındaki izolatörlerin etkinliği değerlendirilmiş ve bu izolatörlerin, yapılar üzerindeki burulma etkilerini minimize edebileceği sonucuna ulaşılmıştır (Ismail, 2015).

Düzensiz betonarme çerçeveli binaların sürtünme sarkaç izolatörleri (FPS) kullanılarak taban izole edilmesi durumunda, yakın-fay etkileri altındaki doğrusal olmayan sismik tepkilerini incelemektedir. Çalışmada, L şeklinde planı olan altı katlı bir bina model alınmış ve farklı izolatör yarıçapı ve sürtünme katsayıları kullanılarak çeşitli senaryolar değerlendirilmiştir. Zaman tanımlı analizler sonucunda, sürtünme kuvveti ve yatay rijitlikteki değişikliklerin binalarda burulma etkisi, kalıcı yer değiştirme ve kaldırma kuvvetlerine neden olabileceği bulunmuştur (Mazza & Mazza, 2016).

2016 yılında Stanford Üniversitesi'nde yapılan, yüksek sürtünmeli kayıcı izolatörlerin deprem dayanıklılığını artırmadaki etkilerini inceleyen çalışmada, izolatör parametrelerinin, sistem performansı üzerindeki etkisi farklı analiz yöntemleriyle araştırılmıştır. İzolatör bileşen testleri ile sistem analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve kayıcı izolatörlerin bazı durumlarda beklenen değerlerden sapmalar gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışma, izolatörlerin

değişen koşullar altında nasıl performans gösterdiğini inceleyen detaylı bir analiz sunmaktadır (Jampole, 2016).

Çavdar ve Özdemir'in yaptığı çalışmada, sismik taban izolasyonu uygulaması, kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimleri kullanılarak gerçekleştirilen bir yapıda, maksimum izolatör deplasmanlarındaki değişim deprem etkisi açısından incelenmiştir. Deprem etkisine açısına bağlı olarak, orijinal kayıtlar ile karşılaştırıldığında, maksimum izolatör deplasmanında belli oranlarda bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu artış miktarının ortalama olarak %2-2.5 civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, sismik taban izolasyonunun yapının hareketlerini kontrol etme kapasitesini artırırken, izolatörlerin deprem sırasındaki performansını da gösterir (Çavdar & Özdemir, 2018).

1999 Marmara Depreminin Düzce Meteoroloji İstasyonu'nda kaydedilen ivme verileri, 0,005 saniye zaman aralığıyla elde edilen ve çerçevelerden oluşan mevcut bir okul yapısına uygulanarak analiz edilmiştir. Bu analiz, lineer olmayan zaman tanım alanı yöntemi kullanılarak yapılmış ve klasik yöntem ile taban izolatörlü sistemin mod şekilleri ve değişen periyotları arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Sonuçlar, izolasyon sistemli yapının periyotlarında kayda değer bir artış meydana geldiğini, spektral ivmelerin ve yapıya gelen kesme kuvvetlerinin azaldığını göstermektedir. Bu gözlemler, taban izolatörlü sistemlerin yapıyı deprem etkilerine karşı daha güvenli ve verimli hale getirebileceğini ortaya koymaktadır (Polat, 2019).

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin deprem etkisi altında, düzenli ve düzensiz çelik çerçeveler üzerindeki performansı araştırılmıştır. Çalışma, izolatörlerin yapısal sistemlere olan etkisini değerlendirmek için 12 katlı düzenli ve düzensiz çelik yapılar üzerinde yapılmıştır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör, izolatör periyodu, efektif sönüm oranı ve rijitlik oranı gibi parametreler kullanılarak modellenmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda, izole edilmiş çerçevelerin izole edilmemiş çerçevelere kıyasla deprem tepkilerini (katlar arası ötelenme oranı, ivme, taban kesme kuvveti vb.) önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Özellikle düzensiz yapılar için %20'ye varan iyileşmeler sağlanmıştır (Deringöl & Mete Güneysi, 2020).

2020 yılında Döker tarafından yapılan çalışmada, burulma düzensizliğine sahip taban izolasyonlu yapıların deprem davranışlarını analiz etmiştir. Çalışma, taban izolasyonlu sistemlerdeki burulma düzensizliklerinin etkilerini araştırmış ve farklı zemin türlerinde izolatörlerin davranışları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, izolatörlerin bazı durumlarda

burulma düzensizliğinin etkilerini artırdığı ve izin verilen düzensizlik katsayılarının aşıldığı tespit edilmiştir (Döker, 2020).

Çerçevik ve arkadaşlarının 2020 yılında yayımlanan çalışmasında sismik izolasyon sistemlerinin tasarımında meta-sezgisel arama yöntemlerinin etkinliğini incelemektedir. Çalışmada, karga arama algoritması, balina optimizasyon algoritması ve gri kurt optimizasyon algoritması (GWO) gibi doğadan esinlenen üç farklı meta-sezgisel algoritma kullanılarak, sismik izolasyonlu binalar ve köprü altyapıları için optimum izolasyon parametreleri belirlenmiştir. Amaç, izolatör deplasman limitlerini aşmadan, en düşük tepe/üstyapı ivmesini sağlayan izolasyon sistemini tasarlamaktır. Optimizasyon işlemleri MATLAB programı ile gerçekleştirilmiş ve yapısal analizler SAP2000 ve ETABS programları kullanılarak zaman tanım alanında, yakın ve uzak saha etkilerine sahip gerçek deprem kayıtlarıyla yapılmıştır. Sonuç olarak, meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak önerilen yöntemlerle optimum sismik izolasyon parametrelerinde yüksek sönümleme oranının daima optimum izolasyon parametrelerini garanti etmediği, ancak minimum çatı ivmesini elde etmek için optimum sönümleme oranının çok önemli olduğu belirlenmiştir (Çerçevik, Avşar, & Hasançebi, 2020).

Çerçevik ve Avşar (2020) çalışmasında, karga arama algoritması kullanılarak doğrusal sismik izolasyon parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, dört katlı bir kayma çerçeve modeli üzerinde SAP2000 ve MATLAB programlarının entegrasyonu ile doğrusal zaman tanım alanında analizler yapılmıştır. Çalışmada, izolatör deplasman limitlerini aşmadan minimum tepe ivmesi sağlayan izolasyon periyodu ve sönüm oranları belirlenmiştir. Farklı deplasman limitleri ve sönüm oranı aralıklarına göre yapılan analizler, optimum parametrelerin genellikle ara değerlerde elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, sonuçlar Niğdeli ve arkadaşlarının (2014) çalışmasıyla karşılaştırılmış ve elde edilen değerlerin benzer olduğu doğrulanmıştır (Çerçevik & Avşar, 2020).

Taban yalıtımlı yapı türleri arasında çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı bir değerlendirme yapılması hedeflenmektedir. Üç farklı yapı türüne sismik taban yalıtımı uygulanmıştır. Sismik yalıtımlı yapılar zaman tanım alanında analiz yöntemine ve statik itme analizi yöntemlerine göre çözümlenmiş ve yalıtım birimi davranışı incelenmiştir. Ayrıca, üst yapı için göreceli kat ötelemelerindeki değişimler de belirlenmiştir (Toplu & Kırtel, 2021).

Yüksek katlı bir binada kurşun çekirdekli izolatörlerin sismik hasarları azaltma üzerindeki etkinliği incelenmiştir. 48 katlı betonarme bir binada izolatörlü sistem ile sabit tabanlı sistem karşılaştırılmıştır. Zaman tanım alanında yapılan doğrusal olmayan analizler

sonucunda, izolatörlerin bina periyodunu uzatarak (yaklaşık %60), katlar arası göreceli yerdeğiştirme ve ivme değerlerini %50 oranında azalttığı bulunmuştur. İzolatörler, yüksek binalarda sismik koruma sağlayan etkili bir çözüm olarak önerilmektedir (Fakih, 2021).

Kurşun çekirdekli izolatörlerin eğri köprülerin sismik izolasyonundaki etkinliğini incelemeyi amaçlamaktadır. İzolatörlerin köprülerdeki yatay ve dikey deprem hareketleri karşısındaki performansı, farklı deprem yükleri altında değerlendirilmiştir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmış ve izolatörlerin çift yönlü davranışının (bi-directional effect) köprü deplasmanlarını önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle çalışmada kullanılan Erzincan(1992) ivme kaydı için kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin köprüde %30'a varan deplasman artışlarına neden olduğu bulunmuştur (Gupta, 2022).

Kanbir ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimlerinin deprem etkisi altındaki davranışını, farklı üstyapı sönüm oranlarının etkisi altında incelemeyi amaçlamaktadır. Üstyapı sönüm oranlarının yapıların sismik performansı üzerindeki etkisi, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerle modellenmiştir. Kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimler, kurşun çekirdeğin ısınmaya bağlı olarak dayanım kaybı gösterdiği bir kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi ile modellenmiştir. Üstyapı sönüm oranı %0, %2 ve %5 olarak alınmış ve bu oranların üstyapı kat ivmeleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, %5 sönüm oranının, üstyapı kat ivmelerinde en büyük azalmayı sağladığını göstermiştir; bu da özellikle titreşime hassas cihazların bulunduğu hastane ve veri merkezi gibi yapılarda önemlidir (Kanbir, Alhan, & Özdemir, 2022).

4 katlı bir betonarme yapının kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler kullanılarak tasarımı incelenen Öztürk'ün yaptığı çalışmada, Farklı zemin sınıfları ve deprem bölgeleri altında yapılan analizler, izolatörlerin yerdeğiştirme ve taban kesme kuvvetlerini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Özellikle ZC zemin sınıfı için %30'a varan deplasman azalması sağlanmıştır. İzolatörlerin doğrusal olmayan davranışları göz önünde bulundurularak, 2018 yılında yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği kapsamında farklı parametreler değerlendirilmiştir (Öztürk, 2022).

Özer'in yaptığı çalışmada, betonarme binalarda ankastre mesnetli sistemler ile çeşitli izolatörlerin (kurşun çekirdekli kauçuk, sürtünmeli sarkaç ve düz kayıcı) sismik performanslarını karşılaştırmaktadır. Çalışmada, yapısal elemanların doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak dinamik analizler yapılmış ve izolatörlerin sismik talepleri %90 oranında sönümlendiği tespit edilmiştir. Özellikle eğri yüzeyli sürtünmeli sarkaç izolatörler,

düzensiz yapılarda daha iyi performans göstermiştir. Düzenli ve düzensiz yapılar üzerinde yapılan 1320 doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi sonucunda, taban izolatörlerinin üst yapı maliyetlerini %20'ye kadar azaltabileceği sonucuna varılmıştır (Özer, 2022).

Sismik izolatörlerin farklı özelliklerinin ele alan çalışmada, bina performansı üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Çeşitli sismik izolatörlerin sismik davranışa etkileri karşılaştırılmış ve izolatörlerin özellikle yüksek katlı binalarda yapısal tepkileri nasıl etkilediği değerlendirilmiştir. Farklı izolatör özellikleri incelenerek, bina deplasmanlarını ve kat ivmelerini azaltmada hangi parametrelerin en etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, yüksek sönüm oranına sahip izolatörlerin %40'a kadar deplasman azaltımı sağladığını göstermektedir (Domadzra, Bhandari, & Hasan, 2024).

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin iki yönlü deprem etkilerine maruz kaldığında, kurşun çekirdeğin ısınma etkisi göz önünde bulundurularak kalan yerdeğiştirmelerde meydana gelen değişimleri incelemektedir. Araştırmada, kurşun çekirdekli izolatörlerin tepki analizi hem ısınma etkisi olan hem de olmayan durumlarda gerçekleştirilmiştir. Çeşitli izolasyon periyotları, akma yerdeğiştirmeleri ve güç-ağırlık oranları dikkate alınarak izolatörlerin iki çizgili kuvvet-değiştirme ilişkileri oluşturulmuştur. Farklı büyüklükte ve darbe özelliklerine sahip zemin hareketleri seçilerek analizlerde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sismik izolatörlerin kalan yerdeğiştirmelerini tahmin etmek için önerilen standart denklemlerin etkinliğini değerlendirmekte de kullanılmıştır. Bu çalışma, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin deprem sırasında performansını etkileyen önemli faktörleri anlamaya yardımcı olmaktadır. (Simsek, Ozdemir, & Yazgan, 2024).

1.2.3. Sezgisel Algoritmalar

Bu bölümde, inşaat mühendisliğinde sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı literatür çalışmaları sunulmuştur. İlk olarak çelik yapıların tasarımında sezgisel algoritmaların kullanımı ele alınmış ve özellikle çerçeve yapıların optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Çelik yapıların kütle minimizasyonu ve rijitlik maksimizasyonu amacıyla genetik algoritma ve parçaçık sürü optimizasyonu sıkça tercih edilmiştir ((Adeli & Sarma, 2006); (Camp & Bichon, 2004); (Lee & Ahn, 2003)). Bu çalışmalarda, yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme limitleri ve eleman boyutlarına ilişkin kısıtlar dikkate alınmıştır.

Zamanla, yapı mühendisliğinde sismik performansın daha fazla önem kazandığı görülmüş ve bu bağlamda deprem tasarımı için sezgisel algoritmaların etkinliği araştırılmıştır. Örneğin, betonarme çerçevelerin sismik güçlendirilmesi amacıyla genetik algoritma, guguk

kuşu algoritması ve uyarlanabilir tabu arama yöntemleri kullanılmıştır ((Kaveh & Talatahari, 2012); (Erbatur & Hasançebi, 2000)). Bu çalışmalarda, maliyet azaltımı, güçlendirme sürekliliği ve maksimum deplasman kriterlerinin göz önünde bulundurulduğu kapsamlı analizler yapılmıştır.

Sezgisel algoritmaların çelik yapı tasarımındaki kullanımı giderek çeşitlenmiş ve bu kapsamda gri kurt optimizasyon algoritması (GWO) etkili bir yöntem olarak öne çıkmıştır. GWO, özellikle çelik çerçeve yapıların ağırlık minimizasyonu ve maliyet etkin tasarımı için kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, yapı elemanlarının kesit boyutlarının belirlenmesi, yer değiştirme ve gerilme kısıtlarının sağlanması gibi mühendislik problemleri ele alınmıştır. GWO'nun, yerel ve global arama yetenekleri arasındaki dengesi sayesinde, çözüm doğruluğu ve işlem süresi bakımından diğer algoritmalara kıyasla üstün performans sergilediği görülmüştür ((Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014); (Bekdaş, Nigdeli, & Yang, 2016)). Bu çalışmalar, gri kurt algoritmasının çelik yapıların optimizasyonunda etkili bir yöntem olduğunu ve mühendislik problemlerine yenilikçi çözümler sunduğunu göstermektedir.

Son yıllarda, çok amaçlı optimizasyon problemleri için sezgisel algoritmaların uyarlanması dikkat çekmiştir. Örneğin, enerji etkin yapı tasarımı kapsamında, yapısal performans ve enerji tüketimini minimize etmek için hibrit sezgisel yöntemler geliştirilmiştir ((Lu & Guo, 2011); (Bekdaş, Nigdeli, & Yang, 2016)). Bu tür çalışmalarda, algoritmaların hız ve doğruluk oranları arasında bir denge sağlanarak optimizasyon süreçleri iyileştirilmiştir.

Optimizasyon probleminin çözümünde, sürü tabanlı yöntemler arasında yer alan bakteri yiyecek arama optimizasyon algoritması tercih edilmiştir. Bu algoritmanın en hafif kafes yapı tasarımı problemlerinin çözümünde etkili bir şekilde kullanılabilmesi için hangi parametrelerin gerekli olduğu üzerinde bir inceleme yapılmıştır. Belirlenen parametreler ile üç örnek problem üzerinde yapılan analizlerin sonuçları, varyasyon katsayılarının %0,7'nin altında olduğunu göstermektedir. Kaymak tarafından yapılan çalışmada elde edilen bakteri yiyecek arama optimizasyon algoritması parametreleri, en hafif kafes yapı tasarımı problemlerinde uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır (Kaymak, 2019).

2. KAVRAMLAR

2.1. Enerji Esaslı Tasarım

Doğada bulunan temel fizik kanunlarından biri her etkiye karşılık bir tepkinin oluşması iken bir diğeri ise her elemanın kararlılık durumunun korunması prensibidir. Yapılar da deprem etkileri sırasında bu prensiplere uyarlar. Yapılar, deprem tarafından iletilen etkiye hareket ve şekil değişikliği ile tepki verir ve ilk konumlarına dönmeye çalışarak kararlı bir davranış sergilerler. Yapının, deprem kuvvetlerine karşı kapasitesiyle vereceği tepki, deprem etkileri ile dengede olursa yapı yıkılmadan ayakta kalır. Enerji esaslı tasarım da bu dengenin sağlanması felsefesine dayanır.

2.1.1. Enerji Kavramı

Fizikte enerji, bir sistemin kuvvet etkisi altındayken iş yapabilme kapasitesi olarak tanımlanır. Doğrudan ölçülemeyen bir büyüklük olup, bir sistemin durumunu değiştirmek için yapılan iş ile belirlenir. Deprem mühendisliğinde kullanılan enerji kavramı ise, kuvvetli yer hareketleri, yani depremlerle ilişkilidir. Deprem bölgelerinde yapılara etkiyen yüklerin dinamik nitelikte olması nedeniyle, yapı sistemleri için yazılacak enerji denkleminde kullanılan kuvvet, deprem etkisi altındaki sistemin genel hareket denkleminde dayanır (Uang & Bertero, 1990).

Klasik iş-enerji tanımına benzer şekilde, bu genel hareket denklemi, yapı sisteminin yerdeğiştirmesine göre entegre edilerek deprem etkisindeki sistemin genel enerji denklemi oluşturulur (Decanini & Mollaioli, 2001). Bu genel enerji denkleminde, yapı sistemleri için tanımlanan çeşitli enerji bileşenleri türetilmiştir. Monotonik yüklemeler altında bir yapı sistemi tarafından tüketilen toplam enerji, akma sınırına kadar depolanan elastik enerji ile doğrusal olmayan davranış sırasında tüketilen plastik enerjinin toplamı olarak ifade edilir (Wong, 2004).

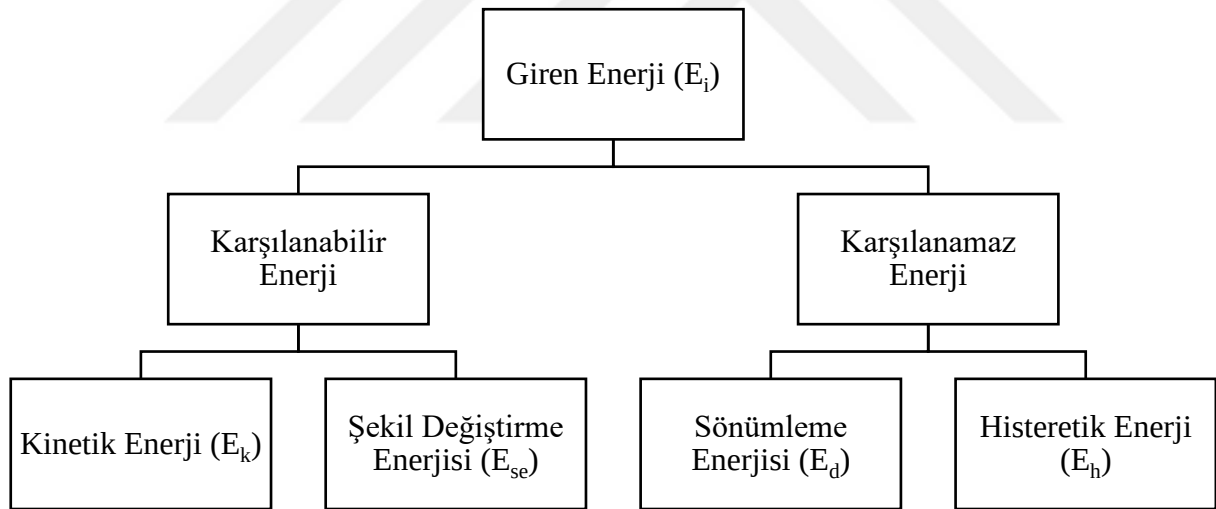
Sistemin doğrusal olmayan davranışı sırasında tüketilen plastik enerji, yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışları sırasında tükettikleri enerjilerin toplamıdır. Örneğin, yalnızca eğilme etkisi altındaki bir taşıyıcı elemanın elastik ötesi enerji tüketimini belirlemek için, elemanın maruz kaldığı moment ile bu moment altında gerçekleşen şekil değiştirme (dönme) değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle, deprem gibi tersinir tekrarlı yükleme etkileri altında çalışan taşıyıcı elemanların moment-plastik dönme ilişkilerinin belirlenmesi, yapının doğrusal olmayan davranış sırasında tükettiği enerjiyi tespit etmek açısından önemlidir (Manfredi, 2001).

2.1.2. Enerji Tanımı

Deprem etkisi altında kalan bir yapı üzerine yer hareketlerinden dolayı bir enerji aktarılmaktadır. Aktarılan bu enerji değerleri yapı üzerinde elastik ve/veya plastik deformasyonlar oluşturmakta ve böylece üzerine gelen enerjiyi çeşitli şekillerde farklı enerji türlerine dönüştürmektedir.

Depreme dayanıklı olarak tasarlanmış bir yapının tersinir yükler altında yeterli deprem performansını gösterebilmesi, taşıyıcı sistemin yatay yük altındaki enerji tüketme kapasitesine bağlıdır (Constantinou M. C., 1998).

Depremden dolayı yapıya aktarılan enerji (input energy) giriş enerjisidir. Yapıya aktarılmış olan giriş enerjisine karşılık tüketilen enerji olması gerekmektedir. Bu tüketilen enerji; kinetik enerji, elastik şekil değiştirme enerjisi, sönüm enerjisi ve plastik şekil değiştirme enerjisinin toplamı oluşmaktadır (Bkz. Şekil 2.1). Bu dört temel enerji türü, yapının enerji tepkisi olarak düşünülebilir (Akbaş & Shen, 2003).



Şekil 2.1. Enerji dağılımı şeması

Kaynak: (Gholami, Garivani, & Askariani, 2022)

Tek serbestlik dereceli sistemlerde enerji denklemleri, dinamik sistemlerin davranışını anlamak için temel bir rol oynar. Yapısal sistemler gerçekte çok serbestlik derecelidir, yani birden fazla serbestlik derecesine sahip olup, karmaşık hareketler sergileyebilirler. Ancak, enerji kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için bu bölümde enerji denklemleri, tek serbestlik

dereceli sistemler için çıkarılacaktır. Tek serbestlik dereceli sistemler, bir yapının dinamik davranışını daha basit bir şekilde modelleyerek, enerji tüketimi ve sönümlenme süreçlerini daha kolay analiz etmeye olanak tanır. Bu yaklaşım, daha karmaşık çok serbestlik dereceli sistemlerinin davranışlarını anlamak için temel bir referans oluşturur. Tek serbestlik dereceli sistemler, yalnızca bir serbestlik derecesine sahip olduklarından, hareketleri genellikle bir tek açı veya bir doğrusal hareketle tanımlanır. Bu tür sistemlerde enerji analizi, genellikle kinetik ve potansiyel enerjilerin toplamının hesaplanması yoluyla gerçekleştirilir (Kane, 1985). Bu yaklaşım, tek serbestlik dereceli sistemlerin enerji denklemlerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılmakta olup, literatürde geniş bir şekilde ele alınmaktadır (Kane, 1985); (Bhatia, 1990).

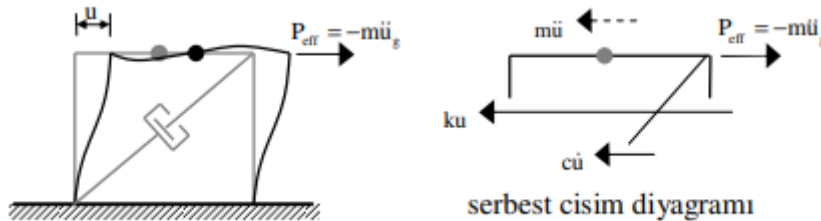
Yapıya gelen giriş enerjisi ve tüketilen enerjinin birbirine eşitlenmesi durumunu açıklamak üzere (D'Alembert prensibine göre) genel dinamik hareket denklemleri kullanılabilir. Bu hareket denklemi deprem tarafından uyarılmış elastik olmayan davranış sergileyebilen bir yapı için şu şekildedir (Chopra, 2011).

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.1)$$

Burada m kütleyi, c viskoz sönüm katsayısını, f_s elastik veya inelastik direnç kuvvetini, $\ddot{u}_g(t)$ yer ivmesini, $-m\ddot{u}_g(t)$ dış kuvveti göstermektedir. $\ddot{u}$ ivmeyi, $\dot{u}$ hızı ve u yerdeğiştirmeyi göstermektedir.

$$F_s = k \cdot u \quad (2.2)$$

Olarak ifade edilir. k rijitliği temsil etmektedir.



Şekil 2.2. Yatay kuvvet etkisindeki BSD elastik sistemin matematiksel modeli

Kaynak: (Hancıoğlu, 2019)

Tek serbestlik dereceli sistemde deprem yer hareketleri tarafından uygulanan giriş enerjisi, hareket denkleminin zamana göre integrasyonu ile hesaplanabilir (Uang & Bertero, 1990). Enerji bazlı prosedürler daha kapsamlı çözümler sunabilir. Housner (1956, 1959), bir yapıya gelen deprem etkisinden dolayı oluşan giriş enerjisinin tahmin edilebilmesi durumunda, dağıtma kapasitesi sağlanarak rasyonel bir tasarıma ulaşabileceğini öne sürmüştür. (Akiyama, 1988) Tek serbestlik dereceli sistem için hesaplanan giriş enerjisinin, çok katlı binalara da uygulanabileceğini göstermiştir. Bu sebeple enerji bazlı tasarımda giriş enerjisini tutarlı bir şekilde tahmin edilmesi önem arz etmektedir.

2.1.3. Enerji Bileşenleri

2.1.3.1. Giriş Enerjisi

Depremler düzensiz yer hareketleri sergilemelerine rağmen, yapıya aktarılan giriş enerjisi (input energy) oldukça istikrarlı bir parametre olarak kabul edilmektedir (Chou ve Uang, 2000; Manfredi, 2001; Akbaş ve Shen, 2003).

Deprem sırasında yapıya giren enerji (input energy), yapının dinamik tepkisini doğrudan etkileyen ve hem yapısal hem de yer hareketi özelliklerine bağlı olan bir kavramdır (Alıcı, 2019). Giren enerji, yapıya aktarılan toplam enerjinin, sönümlenmiş enerji (damping) ve yapının elastik ve inelastik deformasyonlarından kaynaklanan histeretik enerjiye bölünmesiyle formüle edilir (Azizi, 2019). Bir yapıya giren enerji, hem yapısal özellikler (rijitlik, sönümleme oranı gibi) hem de yer hareketi parametreleri (ivme, hız, yerdeğiştirme) ile belirlenir (Azizi, 2019). Bu enerji, esas olarak yer hareketinin karakteristiğine bağlıdır ve yapının tepki periyoduna göre değişir (Alıcı, 2019). Özellikle, yüksek yer hareketi şiddetinde yapıya giren enerji, yapının dayanım kapasitesini zorlayabilir ve bu nedenle sönümleme ve enerji dağılımı kritik hale gelir (Azizi, 2019).

Giren enerjiyi tanımlamak ve hesaplamak için kullanılan başlıca formül, sistemin toplam kinetik enerjisi ve potansiyel enerjisi üzerinden elde edilir. Yani giren enerji;

$$E_i = \int F(t) * u(t)dt \quad (2.3)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada F(t), yapı üzerine etki eden deprem kuvvetini, u(t) ise yapının yerdeğiştirmesini gösterir (Hancıoğlu, 2019) (Börekçi, 2019). Bu formül, deprem yükleri altında yapıya aktarılan enerjiyi hesaplamak için temel alınır. Ayrıca, sönümlenen enerji

ve histeretik enerji, giren enerjinin önemli bileşenleridir; bu bileşenlerin miktarı, yapıların deprem performansını doğrudan etkiler (Sutcu, 2006) (Yanık, 2014).

Yapıya giren enerji, elastik ve elastik ötesi davranışları dikkate alarak formüle edilir ve bu enerji, yer hareketinin süresi, büyüklüğü ve spektral özelliklerine göre değişir. Özellikle inelastik sistemlerde, giren enerji spektrumlarının belirlenmesi büyük önem taşır, çünkü yapıların plastik deformasyon kapasiteleri ve histeretik enerji dağılımı doğrudan bu enerji miktarına bağlıdır (Özen, 2023). Bu nedenle, enerji esaslı analizlerde, yapıya giren enerji tahminleri yapılırken hem elastik hem de inelastik spektrumlar göz önünde bulundurulur (Dedeoğlu, 2023) (Koçan, 2017).

2.1.3.2. Histeretik Enerji

(Okur & Erberik, 2012) ve (Okur & Erberik, 2014), deprem yer ivmelerini ölçeklendirerek tasarım giriş enerji spektrumunu (design energy input spectra) geliştirmiş ve giriş enerjisinin bilinmesi koşulunda ne kadarının histeretik enerjiye dönüştüğünü araştırmıştır.

(Fajfar & Vidic, 1994), histeretik enerjiyi çeşitli parametrelere bağlı olarak şu şekilde ifade etmişlerdir.

$$E_h = (\sqrt{\mu_c - 1}) n_{eq} \frac{(S_a(T))^2}{\omega} \left(\frac{1}{R}\right)^2 \quad (2.4)$$

Burada; E_h sistemin histeretik enerjisi, μ_c sünekliği, $S_a(T)$ elastik spektral ivme, ω açısal frekansı, R süneklik ve periyoda bağlı hesaplanan yapı davranış katsayısı, n_{eq} doğrusal olmayan çevrimsel davranışta eşdeğer döngü sayısı olup, (Zahrah & Hall, 1984) tarafından aşağıdaki formülde ifade edilmiştir.

$$n_{eq} = 1 + (n - 1) m \quad (2.5)$$

Burada; n : dikkate alınan tersinir çevrim sayısı ve m : boyutsuz ortalama çevrimsel yerdeğiştirmedir ve şu şekilde tanımlanmıştır.

$$m = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\delta_i / \delta_{max} \quad (2.6)$$

Burada bahsedilen $\Delta\delta_i$: Her bir çevrimdeki yer değiştirme artışı ve $\delta_{\max}$: Maksimum yer değiştirmeyi göstermektedir. Bu parametreler çevrimler boyunca deformasyonun büyüklüğünü ölçmek için kullanılır.

Denklem 2.1'deki ifade enerji olarak tekrar düzenlenir.

$$E_i = E_m + E_c + E_k \quad (2.7)$$

E_i Deprem enerji girdisini, E_m kütleyle bağlı kinetik enerjiyi, E_c sönüme bağlı vizkoz sönümleme enerjisini ve E_k ise sistemin rijitliğine bağlı yay enerjisini gösterir. E_k da şu şekilde tanımlanabilir.

$$E_k = E_h + E_{se} \quad (2.8)$$

Burada E_h histeretik enerji, E_{se} elastik şekil değiştirmeye bağlı enerji olarak ifade edilir. Histeretik enerji plastik şekil değiştirme ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Sismik izolatörlü yapılarda deprem yükünün büyük bir kısmını izolatörün plastik şekil değiştirmesi ile karşılandığı için tasarımda histeretik enerji büyük önem taşımaktadır. Depremlerden dolayı oluşan yatay kuvvetlerin sismik izolatörlü yapılara etkimesi sonucu yatay deplasmanlar olduğundan birbirine paralel bu iki vektör ile kuvvet-deplasman diyagramı oluşturulursa eğrinin integrali yapılan iş verecektir. Bir sisteme uygulanan kuvvet iş yapıyorsa yapılan iş enerjideki değişime eşittir. Bu işte enerji farkını oluşturduğundan histeretik enerji hesaplanabilir.

2.2. Enerji Tüketim Sistemleri

Başlangıçta hava ve otomobil sektörlerinde kullanılan enerji tüketim sistemleri, 1950'li yıllarda inşaat mühendislerinin ilgisini çekmeye başlamış ve zamanla bu alanda çeşitli tasarım teknikleri geliştirilmiştir ((Housner, 1956); (Uang C. M., 1988); (Gray, 2013)). Son kırk yıl içinde Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'da yüzlerce bina, enerji tüketim sistemleri ile güçlendirilmiş ya da bu sistemler kullanılarak inşa edilmiştir ((Constantinou M. C., 1998); (Soong, 2002)). Bu sistemlerin yapısal davranış üzerindeki etkisi, deprem, rüzgâr ve diğer dinamik dış etkiler sonucu oluşan enerjinin, yapıya eklenen belirli elemanlar aracılığıyla kontrollü bir şekilde tüketilmesi ve ana taşıyıcı elemanlardaki hasarın azaltılması ile ilgilidir.

Ayrıca, enerji tüketim sistemlerinin yüksek sönüm kapasiteleri sayesinde deprem yükleri azaltılmakta ve böylece daha ekonomik bir tasarım yapılması mümkün olmaktadır. Yapıların deprem performansını artırmak için kullanılan enerji tüketim sistemleri, dört ana

grupta sınıflandırılmaktadır: pasif enerji tüketim sistemleri, aktif enerji tüketim sistemleri, yarı aktif sistemler ve karma sistemler. Bu sistemler, yapının deprem anındaki hareketini kontrol ederek, yapısal hasarı azaltmaya ve güvenliğini artırmaya yardımcı olur (Symans M. D., 2008).

Pasif enerji tüketim sistemleri, etkili, maliyet açısından uygun ve kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle en çok tercih edilen sistemlerdir. Bu sistemler, çalışmak için dış bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar; deprem, rüzgar ve diğer dinamik dış etkilerin varlığında aktif hale gelirler. Pasif enerji tüketim sistemleri, sismik izolatörler, metalik sönümleyiciler, sürtünme tipi sönümleyiciler, viskoelastik sönümleyiciler, viskoz akışkanlı sönümleyiciler, ayarlı kütle sönümleyicileri ve ayarlı sıvı sönümleyiciler olmak üzere yedi farklı grupta sınıflandırılmaktadır. Bu sistemler, sağladıkları çevrimsel enerji tüketimi ile birlikte yapının dayanım ve rijitliğini artırarak yapısal performansı iyileştirir. Bu sayede, yapı daha az hasar alır ve deprem gibi dinamik yükler karşısında daha güvenli hale gelir (Spencer, 2003).

Fay kırıldığında ortaya çıkan deprem dalgaları çevreye yayılarak ilerler ve yapıya ulaştığında yapının temelinde titreşimlere neden olur. Bu titreşimler, temeller aracılığıyla tüm taşıyıcı sisteme ve dolayısıyla yapının tamamına iletilir. Yapının bu tür bir etkiden korunması için, temel ile yapı arasında yerleştirilen özel düzeneklerle sismik izolasyon sağlanır, böylece deprem etkisi yapıya aktarılmadan kontrol altına alınır (Celep, 2017).

Geleneksel depreme dayanıklı tasarım yöntemlerinde, yapıların deprem kuvvetlerine karşı ya elastik bir davranış sergileyerek hasar almadan dayanması ya da belirli bir seviyede hasar oluşmasına izin veren sünek bir davranış göstermesi hedeflenir. İlk senaryoda, yapının rijitliği artırılarak deprem kuvvetlerinin dayanımı aşması engellenmeye çalışılır, ikinci senaryoda ise, dayanımın aşılması durumunda yapı elemanlarında sınırlı hasar meydana gelmesi ve göçmenin önlenmesi amaçlanır. Pasif kontrol sisteminin kullanıldığı bu yaklaşımda ise, yapının temelinde enerji sönümleyici düzenekler yerleştirilerek sismik izolasyon sağlanır, böylece deprem sırasında yapının periyodu uzatılarak zeminden gelen sarsıntı etkileri azaltılır (Canbay, Ersoy, Özcebe, Sucuoğlu, & Wasta, 2008).

Sismik izolasyon yönteminde, yapıya etki edebilecek en büyük deprem kuvveti karşısında yapının elastik davranış sergilemesi ve böylece hasarların kontrol altına alınması hedeflenir. Sünek davranış gösteremeyen zayıf yapılar, özellikle yatay yönden gelen kuvvetlere karşı güçlendirilmesi gereken ve deprem riski yüksek bölgelerde bulunan binalar için de bu yöntem tercih edilebilir. Deprem etkisiyle oluşan ivmeler, zeminden üst yapıya aktarılır ve bu da yapıda göreceli kat ötelemelerine ve yüksek kat ivmelerine neden olur. Göreceli kat ötelemeleri,

yapısal veya yapısal olmayan elemanlarda hasara yol açarken, yüksek kat ivmeleri yapısal hasar yaratmasa bile bina sakinlerinin zarar görmesine sebep olabilir.

Tasarım aşamasında, yönetmeliklerin belirlediği sınırlar dahilinde bu olumsuz etkilerin kontrol altına alınması ve azaltılması gerekmektedir. Yapının rijitliğinin artırılması, görelî kat ötelemelerini azaltırken, bu durum zeminden gelen deprem etkilerinin daha şiddetli bir şekilde üst yapıya aktarılmasına ve yüksek kat ivmelerinin oluşmasına neden olabilir. Sismik izolasyon yöntemi ise, esnek yapıyla kat ivmelerini azaltırken, aynı zamanda rijitliği sayesinde deprem sırasında zeminden gelen kuvvetlerin üst yapıya etki ederek oluşturduğu görelî kat ötelemelerini de sınırlayarak etkili bir çözüm sunar (Canbay, Ersoy, Özcebe, Sucuoğlu, & Wasta, 2008).

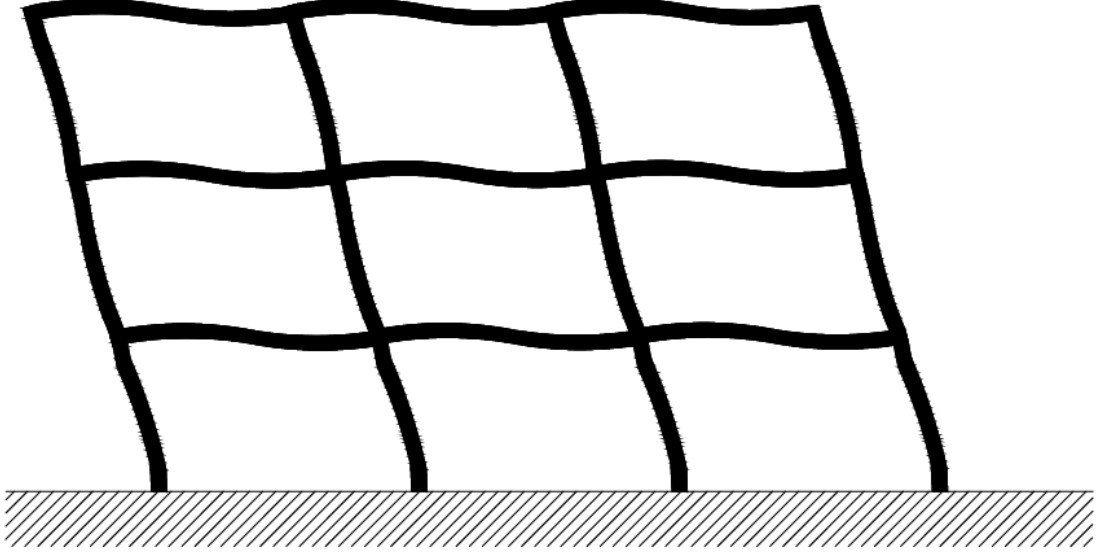
Düşey taşıyıcı elemanların mesnetlerine yerleştirilen sismik izolatörler, yapıyı temel sisteminden ayıran önemli bir bileşendir. Bu izolatörlerin özelliği, yapıya göre daha esnek olmaları ve yatay rijitliklerinin düşük olmasıdır. Bu özellik, izolatörlerin deprem enerjisini emmelerini ve yatay deprem kuvvetlerini filtreleyerek yapıyı korumalarını sağlar. Ayrıca, yapının doğal titreşim periyodunu azaltarak rezonans oluşumunu engeller, böylece yapının deprem etkilerine karşı dayanıklılığını artırır (Housner, ve diğerleri, 1997).

Sismik izolatörlere ilişkin patentler ilk olarak 1800'lü yıllara kadar uzansa da köprüleri ve binaları korumak için sismik izolasyonun kullanımı Amerika Birleşik Devletleri'nde oldukça yenidir; ilk başvuru 1985 yılında Kaliforniya Francisco'da bulunan San Sierra Point Üst Geçidi'nin güçlendirilmesi için tamamlanmıştır (Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz, & Warn, 2007).

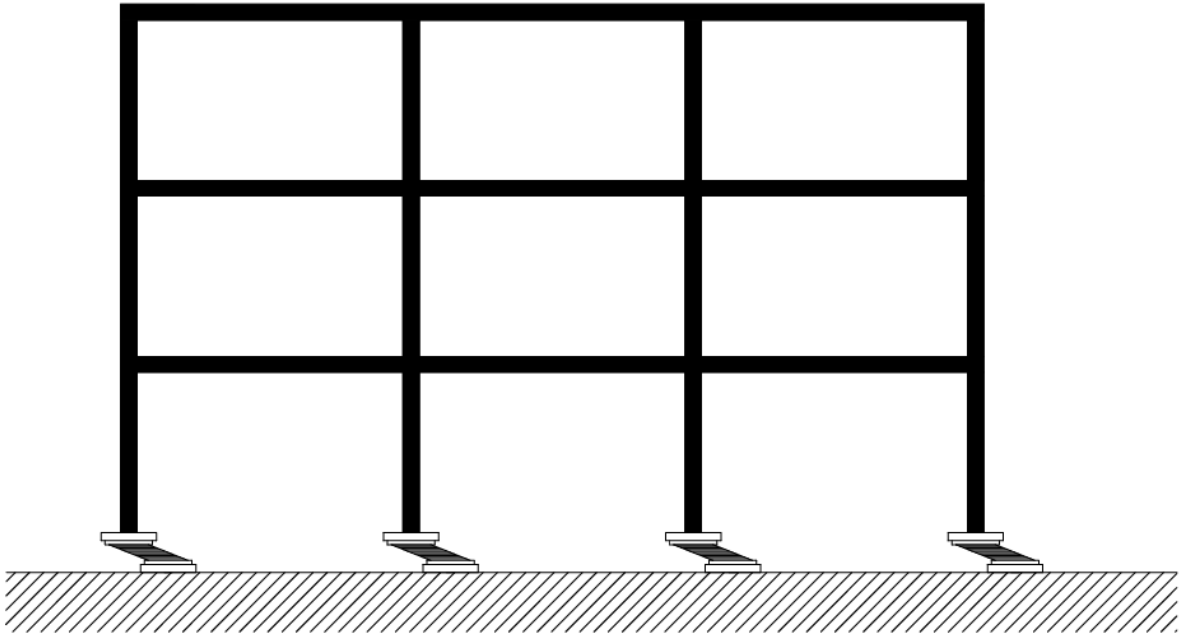
Boyutları bakımından yaklaşık olarak 30 ila 150 cm çapında, 4.000 tona kadar kapasiteye sahip izolatörler üretilmektedir. Özel uygulamalar için özel boyutlar mevcuttur. (Products-Base Isolator, 2019)

Enerji tüketim sistemleri, yapıların depreme dayanıklılığını artırmak amacıyla hem elastik hem de plastik enerji bileşenlerinin etkin bir şekilde yönetilmesi prensibine dayanır. Şekil 2.3'te sismik yükler altında bir yapının esnek davranışıyla oluşan enerji dağılımını temsil eden bir eğilme modeli görülmektedir. Bu model, taşıyıcı elemanların moment-şekil değiştirme kapasiteleri doğrultusunda enerji tüketimini vurgular. Bu tür sistemler, taşıyıcı elemanların histeretik enerji tüketim davranışını optimize ederek yapının deformasyon altında enerji sönümleme kapasitesini artırır. Şekil 2.4'te, sismik izolasyonlu bir yapı modeli gösterilmektedir. Bu sistemler, deprem yüklerini taban seviyesinde izole ederek yapıya iletilen

enerjiyi azaltmayı ve sönümleyici elemanlar aracılığıyla enerji tüketimini optimize etmeyi amaçlar. İki sistemde, deprem sırasında enerji dağılımını dengelemek ve yapısal bütünlüğü korumak için farklı stratejiler sunar.



Şekil 2.3. Konvansiyonel Yapının Şekil Değişikliği



Şekil 2.4. Sismik İzolatörlü Yapının Şekil Değişikliği

Enerji esaslı tasarımda kullanılan izolatörler, yapıların deprem enerjisini güvenli bir şekilde sönmülmesine olanak tanıyan farklı tür ve özelliklerde üretilir. Kayma tipi izolatörler, yapıya yatay hareket esnekliği sağlayarak deprem etkisini azaltır ve titreşimleri kontrol altına alır. Bu sistemlerin bir varyantı olan sürtünmeli sarkaç izolatörler ise sarkaç hareketi ile enerjiyi daha dengeli dağıtır, çok yönlü hareketlere uyum sağlar. Esnek-sürtünmeli taban mesnet sistemleri hem kayma hem de esneme özellikleri sunarak enerjiyi yapı boyunca dengeli bir şekilde dağıtır. Bu izolatör türleri, yapıların deprem yüklerinden kaynaklanan enerjiyi daha çok kendi üzerlerine alma yoluyla tüketerek hasarı minimumda tutmasına yardımcı olur.

Kauçuk esaslı izolatörler ise sönmülme kapasitesini artırarak enerjiyi absorbe eden bir başka önemli çözüm sunar. Düşük ve yüksek sönmülü doğal kauçuk izolatörler, yapının elastikiyetini korurken farklı sönmülme özellikleri ile deprem enerjisini kontrollü bir şekilde emer. Kurşun çekirdekli izolatörler ise, kauçuk katmanlar arasındaki kurşun çekirdeği sayesinde yüksek enerji tüketim kapasitesi sağlar; böylece, yapının dayanıklılığı artarken titreşimler azaltılır. Bu tip izolatörler, yüksek sönmü kapasiteleri ve mekanik özellikleri ile yapının rijitliğini koruyarak, enerji esaslı tasarımın önemli bir parçası haline gelir.

Bu çalışmada, enerji esaslı tasarımın amaçlandığı ve enerji tüketim sistemlerinden biri olan kurşun çekirdekli kauçuk izolatör kullanılmıştır. Bu izolatör tipi, kauçuk katmanlar arasına yerleştirilen kurşun çekirdek sayesinde yüksek enerji tüketim kapasitesine sahiptir ve depremin yapıya ilettiği titreşimleri kontrol altına alarak yapının rijitliğini korur. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerin tercih edilmesi, yapıya eklenen sönmüleyici elemanlarla enerji esaslı tasarım prensiplerinin etkin bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır.

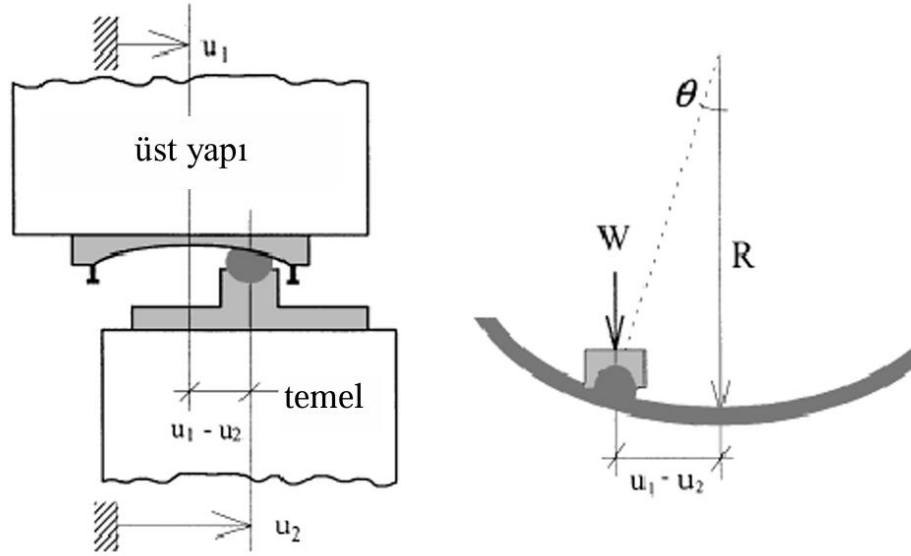
2.2.1. Kayma Tipi İzolatörler

Kayıcı mesnet tipi sistemler, sismik izolasyonun bilinen en eski ve uygulanması kolay yöntemlerinden biridir. 1909 yılında İngiltere'nin Scarborough kentinde yaşayan tıp doktoru Johannes Avetican Calantarients, bu konuda çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında, yapı ile temel arasına bir tabaka ekleyerek, deprem sırasında yapının serbestçe hareket etmesiyle yapıya gelecek deprem kuvvetinin azaltılabileceğini savunmuştur. Bu yaklaşım, deprem kuvvetlerinin yapı üzerindeki etkisini en aza indirmek için kullanılan temel izolasyon tekniklerinden birini oluşturur (Komodromos, 2000).

2.2.2. Sürtünmeli Sarkaç İzolatörler (FPS)

Bu yalıtıcılar, paslanmaz çelikten küresel bir yüzeyde kayıcı mafsallın oluşturduğu sürtünme kuvvetiyle enerjiyi sönmüler. Yapının doğal periyodunu artırarak depremden gelen

ivmeleri azaltır. Sürüklenme kuvveti, sarkaç hareketiyle oluşur ve taban kesme kuvvetinin üst yapıya aktarılmasını sınırlar. Ancak rijitlikteki ani değişiklikler ve sıcaklık değişiminin sürtünme katsayısına etkisi gibi dezavantajlara sahiptir (Zayas, 1987). Bu sürtünmeli sarkaç izolatörü Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Sürtünmeli Sarkaç sisteminin parametreleri

Kaynak: (AYHAN, 2005).

2.2.3. Esnek-sürtünmeli taban mesnet sistemi (R-FBI)

Kayma tipi mesnetlerde ötelenmeden sonra dengeleyici kuvvet olmadığından, esnek sürtünmeli taban mesnet sistemleri geliştirilmiştir. Çelik üzerinde yüksek kayma hızlarında oluşan yüksek sürtünme katsayısı sorununu teflon kullanarak aşmayı amaçlamaktadır. İki plaka arasına yerleştirilen teflon kaplamalı tabakalar yüksek sürtünme sağlar, ortasında ise merkezi kauçuk çekirdek bulunur. Kauçuk çekirdek, sistemin geri döndürme kuvvetini sağlar ancak yanal yükleri düzgün dağıtmadığından, çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Sürtünme kuvveti dinamik etkilere karşı kayma kuvvetini sınırlar, kayma sırasında kauçuk çekirdek deformasyonla geri dönmeye zorlar.

2.2.4. Kauçuk Kullanılan İzolatörler

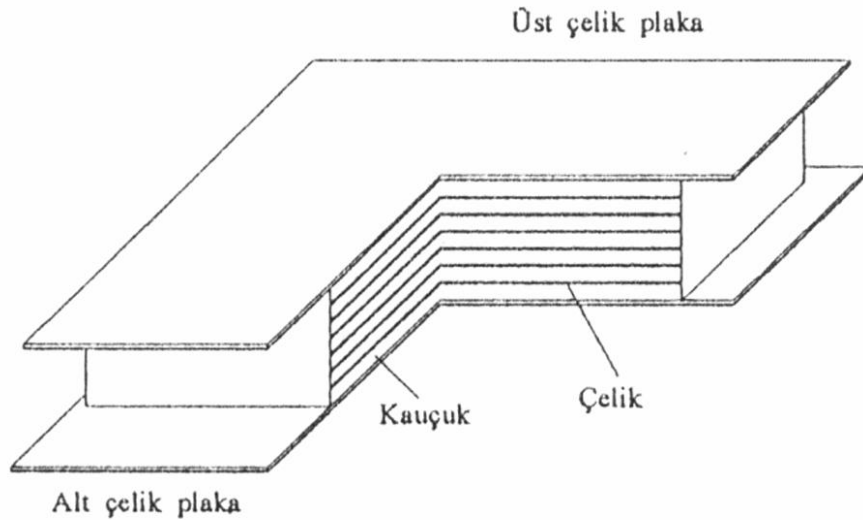
Kauçuktan üretilen sistemler, günümüzde en yaygın kullanılan izolasyon yöntemlerinden biridir. Çelik levhalar kullanılan bu sistemler, üst yapının ağırlığını taşımasına rağmen, deprem anında yapının yatay hareketlerine herhangi bir müdahalede bulunmaz. Bu

kauçuk mesnetler, hacimsel genleşme modülünün Young modülünden daha yüksek olması sayesinde, düşey rijitlikleri yatay rijitliklerinden oldukça fazladır (Özpalanlar, 2004).

Çok tabakalı çelik levhali kauçuk esaslı mesnetler, temel olarak üç gruba ayrılmaktadır: düşük sönümlü doğal kauçuk mesnet sistemleri (LDRB), yüksek sönümlü doğal kauçuk mesnet sistemleri (HDNR) ve kurşun çekirdekli mesnet sistemleri.

2.2.4.1. Düşük sönümlü doğal kauçuk mesnet sistemleri (LDRB)

Düşük sönümlü doğal kauçuk mesnetler, Japonya'da viskoz damperler ve çelik/kurşun çubuklar gibi ek sönüm elemanlarıyla birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da gösterildiği şekilde çelik levhalar arasına yerleştirilen ince çelik saçlar, kauçuğun iki yana deformasyonunu önleyerek düşeyde yüksek rijitlik sağlar, ancak yatay yükler altında yapının davranışını etkilemezler. Kayma gerilmesi altında %2-3 oranında sönüm sağlar, ancak ek sönümleyiciler zamanla mesnete zarar verebilir.



Şekil 2.6. Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDRB)

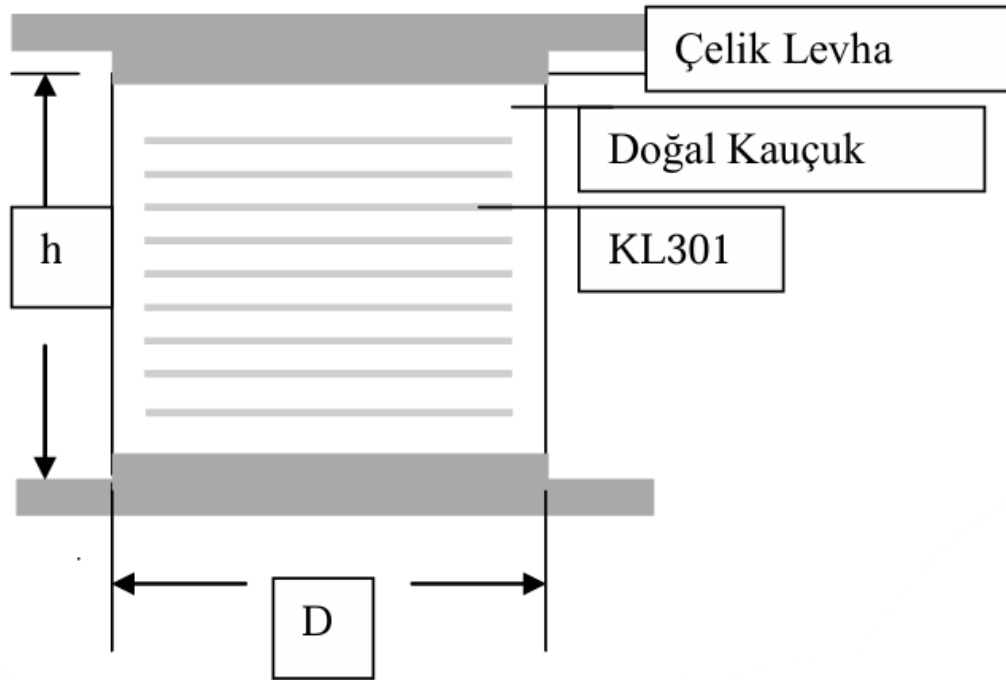
Kaynak: (Özpalanlar, 2004).

2.2.4.2. Yüksek sönümlü doğal kauçuk mesnet sistemleri (HDNR)

Bu sistemler, ek sönümleyici ihtiyacını karşılamak amacıyla 1982'de Malezya Kauçuk Üreticileri Araştırma Kuruluşu (MRPRA) tarafından geliştirilmiştir. Şekil 2.7'de gösterilen bu izolatör, saf kauçuğa eklenen yağ reçinesi, karbon bloklar ve diğer katkı maddeleri ile sönüm seviyesi %10-20 aralığına çıkarılmıştır. Düşük sönüm seviyesine sahip izolatörler düşük

rijitlikte 0.34 MPa kayma modülü gösterirken, yüksek sönüm seviyesine sahip izolatörler ise yüksek rijitlikte 1.40 MPa kayma modülü göstermektedir (NEHRP, 1978).

Kayma deformasyonu %20'den düşük olan malzemeler doğrusal olmayan bir davranış sergilerken, sönümlenme özellikleri ve rijitliği yüksek olan bu sistemler, dinamik etkileri azaltmada etkilidir. Ayrıca, bu sistemler yüksek frekanslı kara yolu ve demir yolu titreşimlerini yapıya ulaşmadan filtreleyebilme yeteneğine sahiptir. Yapılan deneylerde, döngü başına yayılan enerji ile deplasman arasında yaklaşık 1.5 katlık bir orantı bulunmuştur (METU, 2020).



Şekil 2.7. Tipik yüksek sönümlü doğal kauçuk

Kaynak: (Çağlar, 2002).

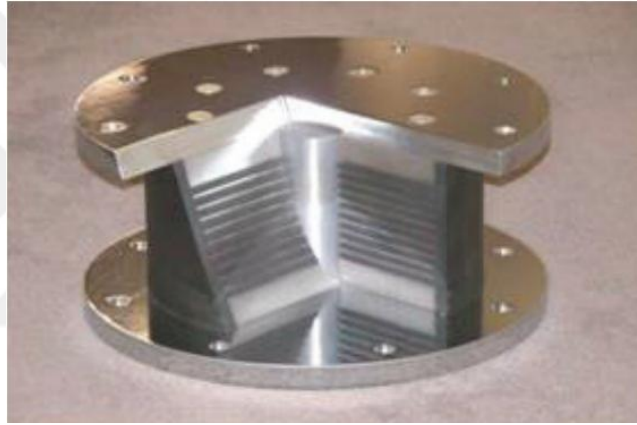
2.2.4.3. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatör

Bu mesnet türü 1970'lerde Yeni Zelanda'da geliştirilmiş ve ardından ABD ile Japonya'da yaygın olarak kullanılmıştır (Robinson & Tucker, 1977). Düşük sönümlü kauçuk yalıtıcılara benzese de rijitliğini artırmak amacıyla çelik levhaların ortasına bir veya daha fazla kurşun çekirdek eklenmiştir. Bu çekirdek, kesme kuvvetiyle oluşan deformasyonu kontrol eder. Akma dayanımı 10 MPa olan kurşun çekirdek, bu değere ulaştığında yatay rijitlikte bir azalma meydana gelir (Tyler & W.H., 1984).

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin etkin sönümlenme ve rijitliği, yerdeğiştirmeye bağlıdır. Kurşun çekirdek, yerleştirileceği delikten biraz büyük seçilerek bir kuvvet yardımıyla sıkıca yerleştirilir. Bu sayede, deprem sırasında oluşan büyük yerdeğiştirmeler sonucunda enerjiyi plastik şekil değiştirerek sönümler. Yerdeğiştirme miktarına bağlı olarak sönümlenme kapasitesi %15 ila %35 arasında değişebilir.

Kurşun kauçuk mesnetler, yapıların deprem etkisi altında kaldığında gerekli olan düşey taşıyıcılığı ve yatay deplasman esnekliğini ve enerji emme kapasitesinin tüm özelliklerini tek bir elemanla sağlar (Robinson W. H., 1982).

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi kurşun kauçuk sismik izolatör çekirdeğinde kurşun olan, etrafında kauçuk malzeme sarı bir yapı formundadır. İzolatörler yapının periyodunu belirli ölçülerde arttırarak depremden dolayı yapıya iletilen ivmeyi azaltmayı amaçlar.



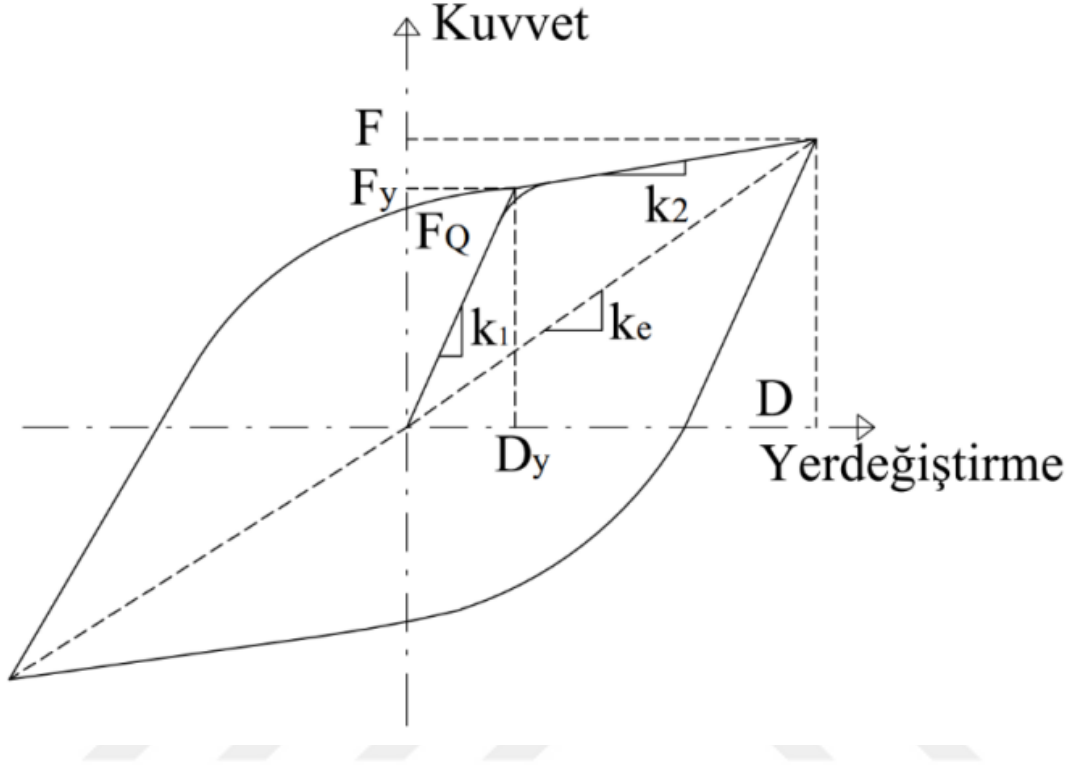
Şekil 2.8. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörün Yapısal Detayı

Kaynak: (Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz, & Warn, 2007).

2.2.4.4. Kurşun Çekirdekli İzolasyon Sistemlerinin Mekanik Özellikleri

İzolatörler deprem yükü altında ilk olarak elastik şekil değişikliğine maruz kalırlar. Ardından deprem etkisi ile birlikte plastik şekil değişikliğine de maruz kalırlar. Deprem etkisi bir ekseninde pozitif ve negatif olduğundan izolatörlerde aynı eksen için pozitif ve negatif yönlerde hareket edecektir. Bu durumda izolatör üzerindeki plastik deformasyona maruz kalan kurşun çekirdek tekrar ilk haline dönmeye zorlanacaktır. Bu da bize yükleme boşaltma şeklinde bir kuvvetin varlığında sürekli olarak pozitif ve negatif şekil değiştirmelerin olacağını gösterir. Bu yüklemeler sonrası ters yöne doğru yükleme esnasında plastik şekil değişikliği olduğundan,

depremden dolayı etki eden yük sıfır konuma gelmiş olmasına rağmen deplasman sıfır konumuna gelemeyecektir. Bu durumda kuvvet deplasman grafiği histeretik bir yapı alacaktır.



Şekil 2.9. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörün Histeretik Kuvvet Deplasman Grafiği
Kaynak: (TBDY, 2018).

Şekil 2.9'da gösterildiği üzere, F maksimum kuvveti, F_y akma kuvvetini, F_q (bu çalışmada Q olarak bahsedilecek) karakteristik kuvveti, D maksimum deplasmanı, D_y akma deplasmanını, k_1 elastik rijitliği, k_2 plastik rijitliği, k_e efektif rijitliği temsil etmektedir.

Akma kuvveti (F_y) izolatörün doğrusal olarak elastik şekil değiştirebileceği en yüksek kuvveti temsil eder.

$$F_y = Q + k_2 * D_y \quad (2.9)$$

Elastik rijitlik (k_1) izolatörün elastik şekil değiştirme kısmında sahip olduğu rijitliği temsil eder (Deringöl & Mete Güneysi, 2020).

$$k_1 = \frac{G_l * A_l}{h_r} \quad (2.10)$$

Burada G_l ve A_l sırasıyla kurşun çekirdeğin kayma modülü ve kesit alanıdır. Bu denklemde bahsedilen h_r değeri kauçuk malzemenin toplam yüksekliğidir. Akma sonrası rijitlik (k_2) izolatörün plastik şekil değişikliği yaptığı bölgedeki rijitliğidir.

$$k_2 = \frac{G_r * A_r}{h_r} \quad (2.11)$$

Burada G_r ve A_r sırasıyla kauçuk kısmın kayma modülü ve kesit alanıdır. Denklemde sözü geçen h_r ise toplam kauçuk yüksekliğidir. Efektif rijitlik (k_e) yükün sıfırdan başlayarak tekrar sıfır durumuna geri dönene kadarki bölgede izolatörün toplam rijitliğini ifade eder.

$$k_e = \frac{Q}{D} + k_2 \quad (2.12)$$

Maksimum kuvvet (F) izolatörün deprem etkisi altında üzerine aktarılan maksimum yükü temsil etmektedir.

$$F = K_e * D \quad (2.13)$$

İzolatör periyodu aşağıda verilmiştir.

$$T_0 = 2 * \pi * \sqrt{\frac{W}{k_2 * g}} \quad (2.14)$$

Oran (R) karakteristik bir özellik olup izolatörün tasarlanabilmesi adına kritik öneme sahiptir.

$$R = \frac{k_2}{k_1} \quad (2.15)$$

Efektif sönüm oranı ve efektif periyod aşağıda sunulmuştur.

$$\beta_{eff} = \frac{2 * Q * (D - D_y)}{\pi * k_e * D^2} \quad (2.16)$$

$$T_{eff} = 2 * \pi * \sqrt{\frac{W}{k_e * g}} \quad (2.17)$$

Kuvvet deplasman grafiğinde, kuvvetler deprem etkisi altında oluşan kuvvetler olduğundan yatay yönde kuvvetleri temsil eder. Deplasmanlar yatay yönle uygulanan kuvvetler sebebiyle yatay yönlü yapılan yerdeğiştirmeleri temsil eder. Bu durumda kuvvet ve deplasmanın çarpılması yani kuvvet deplasman grafiği altında kalan alan bize yapılan işi ve dolayısı ile histeretik enerjiyi vermektedir. Histeretik enerjinin hesaplanması şu iki yöntemle olabilir.

$$E_h = 4 * (D * F_y - F * D_y) \quad (2.18)$$

$$E_h = 2 * \pi * k_e * \beta_{eff} * D^2 \quad (2.19)$$

2.2.4.5. Kurşun Çekirdekli Sismik İzolasyon Sistemlerinin Klasik Tasarımı

Sismik izolatör tasarımı maksimum yatay yerdeğiştirmeyi ve maksimum kesme kuvvetinin belirlenmesi hususuna dayalı tekrarlı bir yöntemdir. Sismik izolatör tasarımı her yapıda farklılık göstereceğinden tek düze bir şekilde hesaplanarak tasarım yapılması zordur. İzolatörün bağlı olduğu yapının kütlesi, rijitlik özellikleri ve buna bağlı olarak periyodu izolatörün parametrelerini belirlemede büyük rol oynar. Bu zorluktan dolayı izolatör tasarımında başlangıç değerlerinin tahmin edilmesi gerekir. Hesabın yapılabilmesi için Q/W oranı ve yapının periyoduna ihtiyaç vardır. Q/W karakteristik dayanımın ağırlığa oranı için farklı sınır değerler tarif edilmiştir. Q/W oranı için (Providakis, 2008) çalışmasında %7,5 ile %12,5 değerlerini kullanırken, (Özdemir & Bayhan, 2015) çalışmasında üst ve alt sınır olarak %14 ve %10 değerlerini kullanmıştır. (Özdemir, Avşar, & Bayhan, 2011) Çalışmasında ise %4 ile %12 arası değerleri kullanmıştır. Yapının periyodu ise akma sonrası rijitlik (k_2) için belirlenecek değerlerin hesaplarında kullanılmaktadır. (Bu tekrarlı çözümlerde bir diğer parametre de akma deplasmanıdır. Akma deplasmanı kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler için 25 mm (Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz, & Warn, 2007) veya 10 mm (Ryan & Chopra, 2004) olarak tanımlandığından bu çalışmada her iki değere de yer verilmiştir.

Konvansiyonel izolatör tasarımında bir deplasman değeri kabul edilerek gerekli hesaplama işlemlerine başlanır. Hesaplanan yeni deplasman değeri tahmin edilen deplasman değeri ile mukayese edilir. İki deplasman değerinden hedefe daha yakın olan seçilerek işlem tekrarlanır. Bu tekrarlama işlemi iki deplasman değeri arasında bir hata payı oranı altına inene kadar devam edilir. İki deplasman değeri arasında hata payına ulaşırsa döngü işlemi sonlandırılır. Sismik izolatörlerin ön tasarımını yöneten şartnameler (American Society of Engineers, 2010) tarafından önerilmiştir.



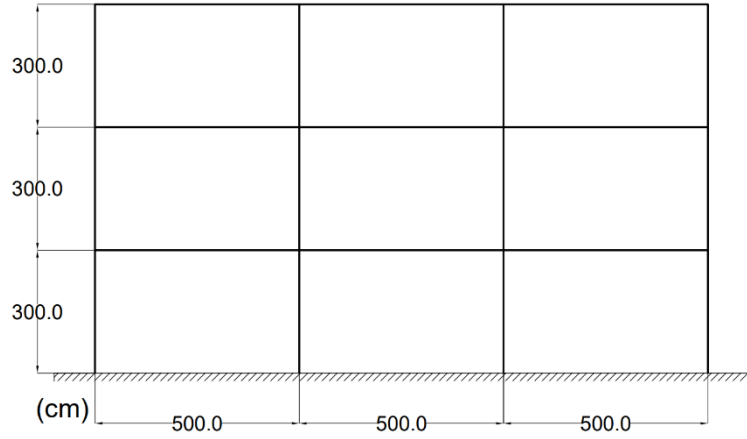
3. MATERYAL-METOT

Farklı sismik izolasyon özelliklerine sahip yapı sistemlerinde, yapı tepkileri ile giren enerjinin değişimini incelemek ve en uygun izolasyon sistemini önerilen grafik yöntemle belirlemek amacıyla öncelikle üst yapı hazırlanmıştır. Hazırlanan üst yapının taban katına izolasyon sistemleri yerleştirilerek 7 farklı ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılarak giren enerji ve yapı tepkileri kıyaslanmıştır. Sismik izolasyon sistemi olarak kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler seçilerek, izolatör parametreleri hazırlanan yazılım yardımı ile kapsamlı şekilde değiştirilmiş ve olası pek çok izolatör sisteminin analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kullanılarak grafik bir metot önerilmiştir. Sonrasında Gri Kurt Algoritması (GWO) ile izolasyon parametreleri optimize edilerek sonuçlar grafik metotla hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3.1. Üst Yapı Modeli

Bu çalışma kapsamında örnek model olarak seçilen üst yapı modeli daha önce bir sismik izolasyon çalışmasına örnek olmuş bir modeldir (Deringöl & Mete Güneyisi, 2019). Daha önce yapılan çalışmada moment aktaran çelik çerçevelerin sürtünmeli sarkaç ile uygunluğu incelenmiş, bu çalışmada ise tekrarlı analizler yapılarak kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü yapılara giren enerji değişimleri araştırılmıştır.

Örnek üst yapı modeli, moment aktaran bir çelik çerçevedir. Yapı malzemesi, Avrupa standartları olan EN 1993-1-1 ile EN 10025-2 standartlarına uygun olacak şekilde S235 yapı çeliğidir. Kolon açıklıkları 5m ve kat yükseklikleri 3m olarak modellenmiştir. Giren enerji ile yapı tepkilerinin karşılaştırılmasını amaçlayan bu çalışmada, farklı katlardaki değişimleri incelemek için aynı kat yüksekliklerine ve açıklıklarına sahip 3, 6 ve 9 katlı üç örnek üst yapı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan üç yapı modeli de doğrusal olarak tasarlanmıştır. Tekrarlı analizlerin çokluğu ve analiz süresi değerlendirilerek üst yapı modelleri iki boyutlu tasarlanmıştır. 3 katlı örnek üst yapı modeli Şekil 3.1’de ve eleman kesitleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada Kullanılan Üst Yapı Örneği

Tablo 3.1. Örnek üst yapı modelinin aks sayıları ve eleman kesitleri

Kat Sayısı	Aks Sayısı	Kiriş Kesitleri	Kolon Kesitleri
3	4	IPE330	HE240B
6	4	IPE360-IPE330	HE260B-HE240B
9	4	IPE400-IPE360-IPE330	HE300B-HE260B-HE240B

Üç örnek üst yapı modelinin sayısal modeli SAP2000 programı V24.0.0'da hazırlanmıştır. Her kat seviyesinde rijit diyafram tanımlanmıştır. Bu durum, her kattaki düğüm noktalarının aynı yatay deplasmanı gerçekleştirmesini sağlamaktadır. Yani kat seviyesinde rijit diyafram sayesinde tüm düğüm noktaları yatayda birlikte hareket edecek şekilde sınırlandırılmıştır.

Her kiriş üzerinde oluşacak ağırlık, yayılı yük olarak 27,5 kN/m varsayılmıştır. Malzeme özellikleri gereği akma dayanımı 235 MPa olup, örnek üst yapı sayısal modelleri elastik doğrusal modellenmiştir.

Analizde yapı sönüm oranı her mod için sabit sönüm olacak şekilde sönümleme oranı %5 olarak seçilmiştir.

Örnek üst yapı modelleri öncelikle tabanı ankastre olarak modal analiz yapılmıştır. Bu periyot değeri, yapının temel dinamik özelliklerini yansıtarak, birinci modda yapı titreşimlerinin zamanla nasıl bir tepki verdiğini gösterir. Tabanın ankastre olarak kabul

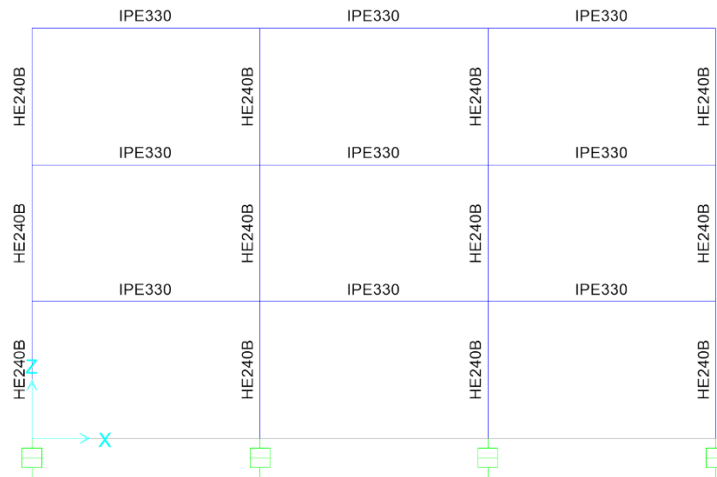
edilmesi, yapı tabanında tüm serbestliklerin kısıtlandığını, yani tabanda yatay ve düşey yönde herhangi bir hareket veya dönmeye izin verilmediğini ifade etmektedir. Örnek üst yapı modelinin tabanı ankastre modellendiğinde doğal titreşim periyotları Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2. Örnek üst yapı modelinin tabanı ankastre modellendiğinde doğal titreşim periyotları

Kat Sayısı	$T_1(s)$	$T_2(s)$
3	0,73	0,23
6	1,31	0,44
9	1,75	0,62

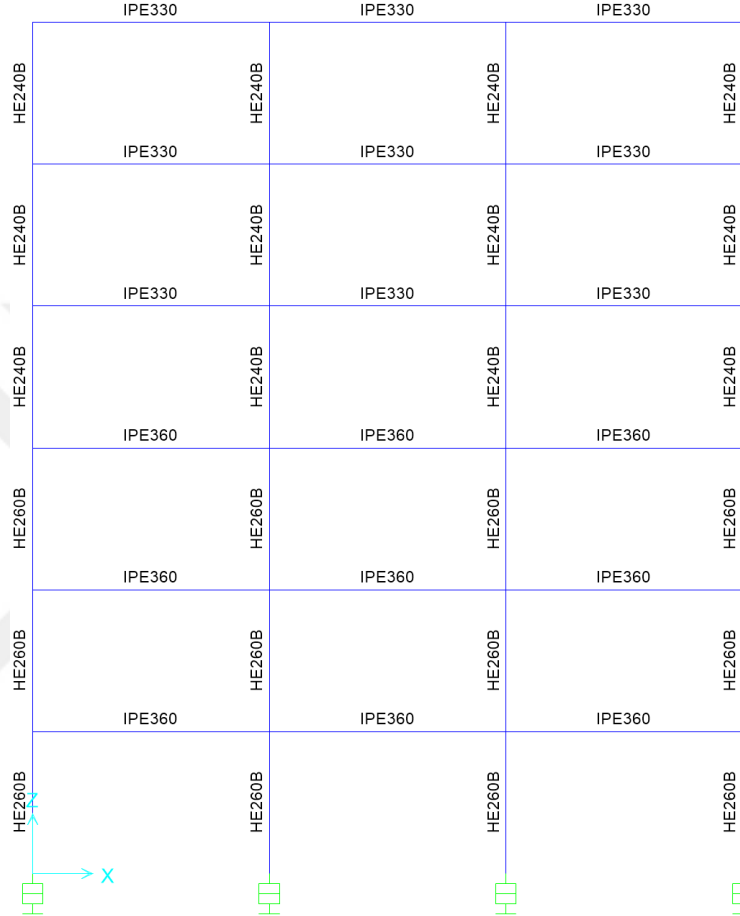
Hazırlanan örnek üst yapıların taban katındaki kolonların alt uçlarına, deprem enerjisini sönümlemek ve yapı performansını artırmak amacıyla kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler yerleştirilmiştir. Bu izolatörler, yapının dinamik yükler altında daha esnek bir şekilde hareket etmesine olanak tanınması ve deprem etkisi altında yapıya gelen enerjiyi sönümleyerek daha az hasar almasını sağlaması amacıyla kullanılmıştır. Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, sismik izolasyon özelliklerine sahip olup, yapı tabanındaki deformasyonları kontrol altına alarak üst katlara aktarılan yükleri azaltmaktadır.

Yapı elemanlarına açısından, üç katlı yapı modeli için HE240B profil kolonlar seçilmiş ve taşıyıcı kolon elemanları olarak kullanılmıştır. Kiriş elemanları için ise IPE330 profil kesitleri tercih edilmiştir. Taban katına sismik izolasyon yerleştirilmiş 3 katlı örnek yapı modelinin sayısal modeli ve kesit tipleri Şekil 3.2’de verilmiştir.



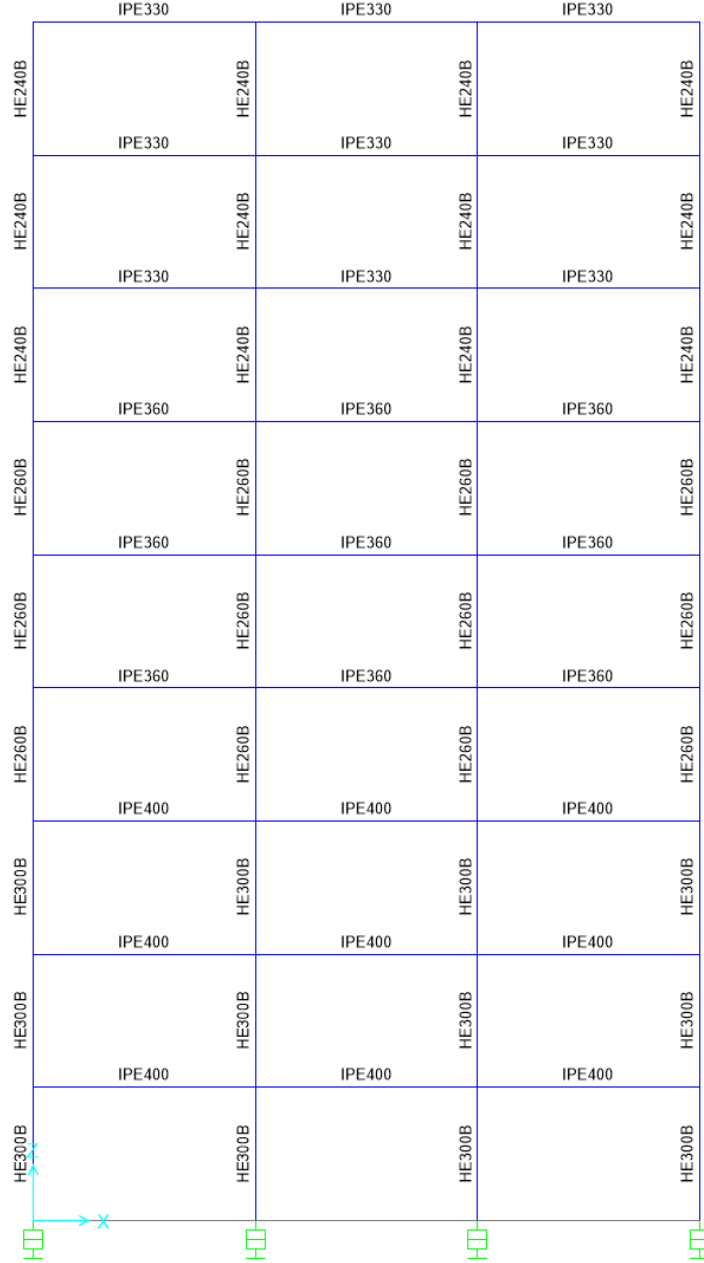
Şekil 3.2. Sap2000 Yapı Modeli (3 Katlı)

6 katlı yapının ilk 3 katında HE260B profil kesitli kolonlar ve IPE360 profil kesitli kirişler, üstünde kalan diğer 3 katta ise HE240B profil kesitli kolonlar ve IPE330 profil kesitli kirişler seçilmiştir. Taban katına sismik izolasyon yerleştirilmiş 6 katlı örnek yapı modelinin sayısal modeli ve kesit tipleri Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Sap2000 Yapı Modeli (6 Katlı)

9 katlı yapının ilk 3 katında HE300B profil kesitli kolonlar ve IPE400 profil kesitli kirişler, üstünde kalan orta 3 katta HE260B profil kesitli kolonlar ve IPE360 profil kesitli kirişler en üst 3 katta ise HE240B profil kesitli kolonlar ve IPE330 profil kesitli kirişler seçilmiştir. Taban katına sismik izolasyon yerleştirilmiş 9 katlı örnek yapı modelinin sayısal modeli ve kesit tipleri Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Sap2000 Yapı Modeli (9 Katlı)

3.2. Dinamik Analizler İçin Deprem Kayıtlarının Seçilmesi

Farklı dinamik analiz yükleme metotları olmasına karşın gerçekçi sonuç bulmak amacı ile deprem yer ivmelerinin dinamik yük olarak uygulanması tercih edilmiştir. Bu bölümde deprem yer hareketlerinin seçiminde uygulanan metotlar anlatılacaktır.

Dinamik analizlerde kullanılan değerler genellikle ivme-zaman grafikleri olduğundan, öncelikle bu grafiklerin elde edilmesi gereklidir. Bu grafikler üç farklı şekilde elde edilebilir. İlk yöntem, yapay deprem kayıtlarının üretilmesidir. Ancak, yapay kayıtların kullanılmasının bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlardan biri, yapay kayıt kullanıldığında gerçeğe uygun olmayan ve genliği yüksek çok sayıda döngünün oluşmasıdır. (Özdemir, 2010).

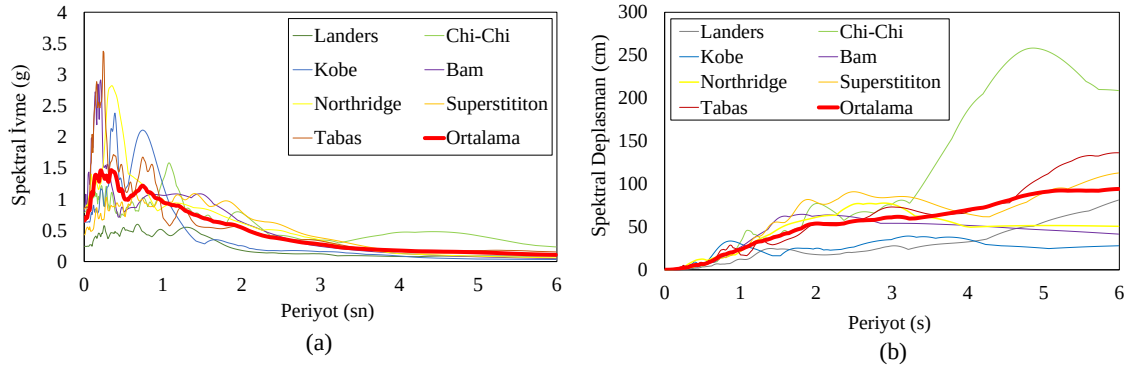
İkinci yöntem, sentetik deprem kayıtlarının kullanılarak ivme-zaman grafiklerinin elde edilmesidir. Bu kayıtların üretilmesi, sismolojik modellere dayanmaktadır. Zemin koşulları, sismolojik modellerin oluşturulmasında önemli bir rol oynar. Sentetik deprem kayıtlarının kullanılması, incelenen değişkenlerin etkilerinin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesi açısından önem taşır. (Özdemir & Dicleli, 2012).

Üçüncü yöntem ise gerçek deprem kayıtlarının kullanılmasıdır. Son yıllarda, genel veri tabanlarının yaygınlaşması sayesinde deprem kayıtlarına ulaşmak oldukça kolaylaşmıştır. Dünya genelinde meydana gelen depremlerin kayıtlarına, başta PEER veri tabanı olmak üzere birçok kaynaktan erişmek mümkündür. Bu veri tabanları, araştırmacılara depremin büyüklüğü, faya olan mesafe, maksimum yer ivmesi, maksimum yer hızı, maksimum yer deplasmanı ve zemin koşulları gibi değişkenleri sınırlandırarak arama yapma imkânı sunmaktadır.

Bu çalışmada, kullanılan deprem ivme kayıtları, PEER Kuvvetli Yer Hareketi Veri Tabanından alınmıştır. Farklı fay mekanizmaları kullanılarak seçilen deprem ivme kayıtları büyüklükleri 6.5 M_w değerinden büyük depremler seçilmiştir. Çalışmada kullanılan ivme kayıtlarının verileri Tablo 3.3'te ivme ve deplasman spektrumları Şekil 3.5'te sunulmuştur.

Tablo 3.3. Zaman tanım alanında analizler için seçilen deprem yer hareketleri ve karakteristikleri **Kaynak:** Peer 2024.

Deprem İsmi	Yılı	İstasyon İsmi	Deprem Büyüklüğü (M_w)	Mekanizması	R_{jb} (km)	PGA (g)	PGV (m/s)
Tabas, İran	1978	Bajestan	7.35	Ters	1.79	0.85	0.99
Bam, İran	2003	Bam	6.6	Doğrultu Atımlı	0.05	0.81	1.24
Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	7.62	Ters Oblik	0.57	0.79	1.25
Kobe, Japan	1995	KJMA	6.9	Doğrultu Atımlı	0.94	0.63	0.76
Superstition Hills	1987	Parachute Test Site	6.54	Doğrultu Atımlı	0.95	0.43	1.34
Landers	1992	Yermo Fire Station	7.28	Doğrultu Atımlı	23.62	0.24	0.51
Northridge	1994	Sylmar - Olive View Med FF	6.69	Ters	1.74	0.84	1.29



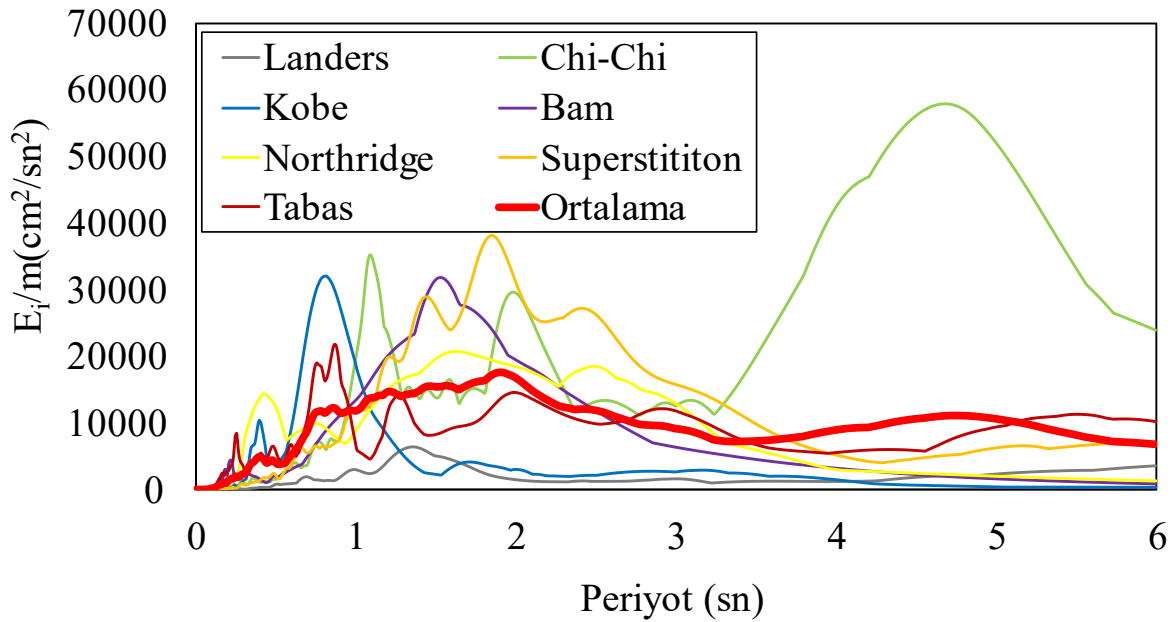
Şekil 3.5. Deprem ivme kayıtlarına ait %5 sönümlü ivme (a) ve deplasman spektrumları (b)

Kaynak: Peer 2024

Çalışma kapsamında sismik izolasyonlu yapılara giren enerji değerler incelendiğinden enerji spektrumu belirlenmiştir. Tek serbestlikli sistemlere giren enerjinin belirlenmesi için birçok metot bulunmaktadır. Bu çalışmada Housner tarafından önerilen, denklem 3.1’de verilen denklem kullanılmıştır (Housner, 1956).

$$E = \frac{1}{2} m S_{v,n}^2 \quad (3.1)$$

Burada m yapının toplam kütlesi, S_v belirli bir sönüm oranında sözde spektral hızdır (PSV). Denklem (3.1) kullanılarak, periyoda bağlı enerji spektrumları Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

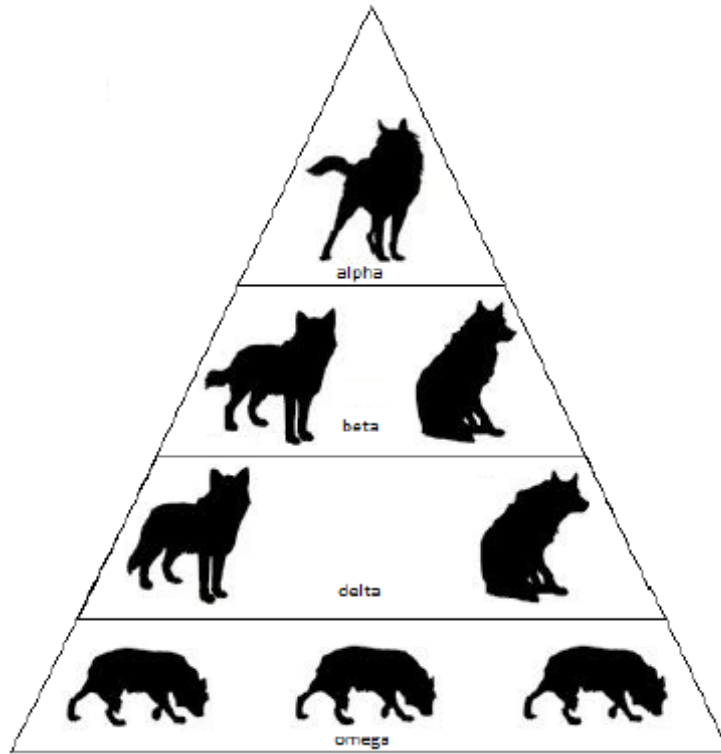


Şekil 3.6. Deprem ivme kayıtlarına ait %5 sönümlü enerji spektrumları

Kaynak: Peer 2024

3.3. Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (Grey Wolf Optimizer, GWO)

Mirjalili ve çalışma arkadaşları, 2014 yılında gri kurtların (*Canis lupus*) davranışlarından esinlenerek yeni bir meta-sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Gri Kurt Algoritması, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisi ile avlanma mekanizmasını modelleyen bir yapıya sahiptir. Gri kurtlar doğada genellikle 5 ila 12 bireyden oluşan gruplar halinde yaşar. Bu gruplar, liderlik pozisyonunda bulunan "alfa" kurt tarafından yönetilir. Alfa kurdun ardından hiyerarşide sırasıyla beta, delta ve omega kurtlar gelir. Alfa kurt, grubun avlanma stratejilerini belirleyen, uyuma yerini seçen ve takip edilecek yolu tayin eden liderdir. Beta kurt, alfa kurdun yardımcı olurken, delta kurtlar omega kurtlarını yönetmekle birlikte, alfa ve beta kurtların altında üçüncü sırada yer alır. Omega kurtlar ise hiyerarşik yapının en alt basamağında bulunur (Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014). Şekil 3.7’de kurt sürüsünün hiyerarşik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Gri kurt sürüsünün aşağıdan yukarı doğru artan liderlik hiyerarşisi.

Kaynak: (Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014).

Gri kurtların sürü halinde avlanması, sosyal bir davranış biçimi olarak gelişmiştir. Sürü, alfa kurdun belirlediği bir avı, onun liderliğinde kuşatarak avlar. Alfa kurt, avın konumuna göre sürü üyelerini en uygun pozisyonlara yönlendirir ve gerektiğinde bu pozisyonları değiştirir. Gri Kurt Algoritması (GWO), gri kurtların sosyal hiyerarşisini, avın izlenmesi, çevresinin stratejik

olarak sarılması ve avlanması davranışını matematiksel bir modelle ifade eder. Bu model, problemlerde en iyi çözüme ulaşmayı sağlayan bir algoritma sunar. (Şekil 3.8) (Mirjalili vd., 2014).



Şekil 3.8. Gri kurtların avlana davranışları: (A) av peşinde koşmak, yaklaşmak ve izlemek (B – D) takip etmek, taciz etmek ve çevrelemek (E) durağan durum ve saldırı

Kaynak: (Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014).

3.3.1. Matematiksel Model

Gri kurtların avlanma stratejisinin matematiksel modelinde, alfa, beta ve delta kurtlarının avın konumu hakkında daha iyi bilgi sağladığı varsayılmaktadır. Bu nedenle GWO algoritmasında, kurtların konumlarını güncellemek için en iyi üç çözüm (alfa, beta ve delta) kullanılır. Ancak, omega kurt GWO algoritmasında yer almaz. Bu bölümde, sosyal hiyerarşinin takibi, çevreleme, avlanma ve saldırıya uğrayan avların matematiksel modeli ele alınacaktır.

3.3.2. Avin Etrafını Sarma

Kurt sürüsünün avlanırken konumlarının avın etrafını sarması izleyen eşitliklerle matematik olarak modellenmiştir (Mirjalili vd., 2014):

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (3.2)$$

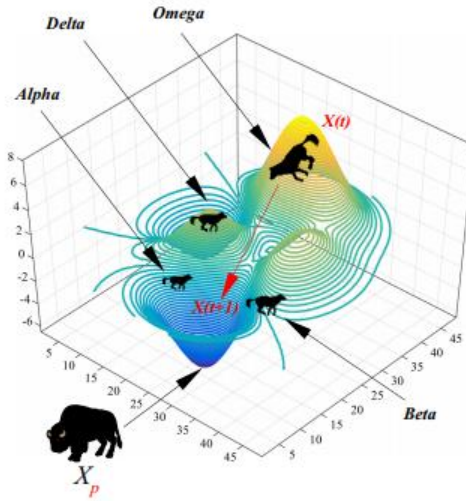
$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (3.3)$$

Burada, t iterasyon sayısını, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayı vektörlerini, $\vec{X}_p$ avın pozisyon vektörünü, $\vec{X}$ gri kurdun pozisyon vektörünü, $||$ mutlak değeri, “.” ise vektörlerin eleman elemana çarpımını ifade etmektedir. $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ vektörleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3.4)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (3.5)$$

Burada $\vec{a}$ 2’den 0’a doğrusal olarak her bir iterasyonda azalan bir vektör, $\vec{r}_1$ ve $\vec{r}_2$ $[0,1]$ arasında rastgele sayılardan oluşan vektördür.

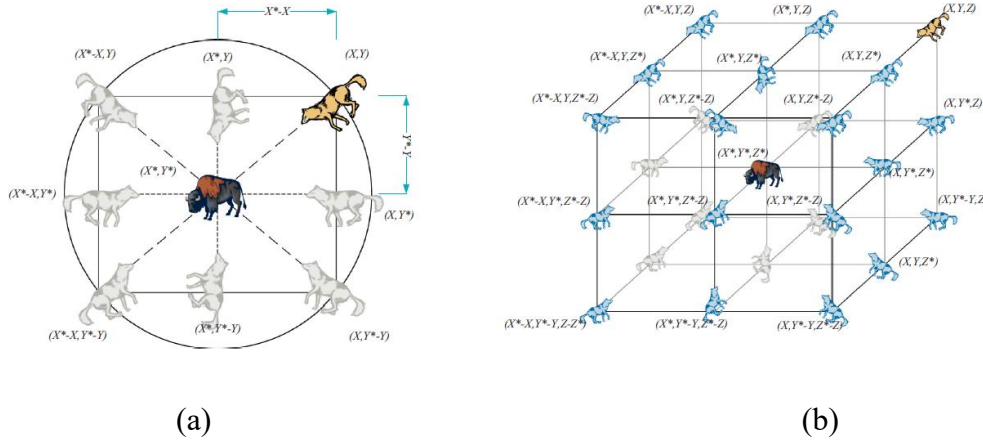


Şekil 3.9. Alfa, beta, delta ve omega kurtlarının ava yaklaşmasının grafiksel gösterimi

Kaynak: (Faris, 2018).

Şekil 3.9’te görüldüğü üzere, genel uzayda X_p konumu avı, yani en iyi çözümü ifade ederken, $X(t)$ omega kurdunu, yani arama uzayındaki herhangi bir sonucu temsil eder. Sürüde, alfa kurt avın konumuna en yakın olan yeni en iyi sonucu ifade eder. Diğer kurtlar ise hiyerarşideki konumlarına göre en iyi çözüme farklı mesafelerde yer alır. Sonuç olarak gri kurt sürüsü üyeleri, alfa, beta ve delta kurtlarının yönlendirmesiyle avlarına göre pozisyonlarını güncelleyerek avı kuşatır. İki boyutlu bir uzayda, Denklem (3.5)’de verilen denklemlerle hesaplanan pozisyon vektörü ve olası komşular Şekil 3.10 (a)’da gösterilmektedir. Bu şekilde, (X, Y) pozisyonunda bulunan gri bir kurt, avının konumuna göre pozisyonunu (X^*, Y^*) olarak değiştirebilir. En iyi etkenler çevresinde farklı yerler, A ve C değerlerinin ayarlanmasıyla mevcut konuma göre ulaşılabilir. Üç boyutlu uzayda gri bir kurdun güncellenmiş pozisyonları Şekil 3.10 (b)’de

verilmiştir. Aynı yaklaşım, nnn-boyutlu bir arama alanına genişletilebilir ve gri kurtlar, avın etrafında küre veya küp şeklinde pozisyon değiştirerek hareket edebilir.



Şekil 3.10. 2D (a) ve 3D (b) uzayında pozisyon vektörleri ve muhtemel bir sonraki pozisyonları.

Kaynak: (Faris, 2018).

3.3.3. Avlanma

Alfa (en iyi aday çözüm), beta ve delta tipi gri kurtlar, avın potansiyel konumu hakkında daha üstün bilgiye sahiptir. Bu nedenle, GWO algoritmasında ilk üç en iyi çözüm kaydedilir ve diğer kurtlar pozisyonlarını bu üç arama kurdunun konumlarına göre günceller. Kurt sürüsünün avlanma sürecindeki pozisyon değişiklikleri, matematiksel olarak aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmiştir (Mirjalili vd., 2014):

$$\vec{D}_a = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_a - \vec{X}| \quad (3.6)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (3.7)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (3.8)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_a - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_a) \quad (3.9)$$

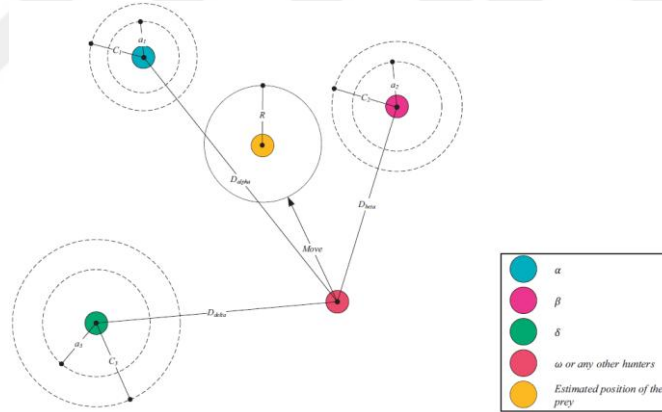
$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (3.10)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (3.11)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (3.12)$$

Burada, $\vec{D}_\alpha$, $\vec{D}_\beta$, $\vec{D}_\delta$, alfa, beta ve delta kurtlarının av ile arasındaki vektör mesafesini, $\vec{X}_\alpha$, $\vec{X}_\beta$, $\vec{X}_\delta$, alfa, beta ve delta kurtları için avın pozisyon vektörünü, $\vec{C}_1$, $\vec{C}_2$, $\vec{C}_3$, $\vec{A}_1$, $\vec{A}_2$, $\vec{A}_3$ alfa, beta ve delta kurtları için katsayı vektörlerini, $\vec{X}(t + 1)$, gri kurdun i'inci iterasyonda pozisyon vektörünü göstermektedir.

Gri kurt sürüsü, avının yerini tespit edip kuşatabilir ve bu süreç, sürünün lideri olan alfa kurt tarafından yönetilir. Beta ve delta kurtları da zaman zaman avlanma sürecine katılır. Ancak, sürü üyelerinin arama uzayında avın en iyi pozisyonu hakkında kesin bir bilgiye sahip olmadığı varsayılır. Gri kurtların avlanma davranışlarında, alfa, beta ve delta kurtları, avın potansiyel pozisyonu hakkında diğer kurtlara kıyasla daha iyi bilgiye sahiptir. Bu üç kurtun konumları doğrultusunda elde edilen en iyi üç çözüm kaydedilir ve diğer kurtlar pozisyonlarını bu üç konuma göre günceller. Şekil 3.11 arama uzayında alfa, beta ve delta kurtlarına göre bir grup içindeki başka bir kurdun pozisyonunun nasıl güncellendiğini göstermektedir.



Şekil 3.11. GWO'da sürü bireylerinin pozisyonlarının güncellenmesi

Kaynak: (Mirjalili, Mirjalili, & Lewis, 2014).

3.3.3.1. Avına saldırı

Gri kurtlar, avın konumunu sabitlediklerinde saldırıya geçerler. Bu davranışın matematiksel modelinde, $\vec{a}$ değeri azaldıkça, $\vec{A}$ dalgalanma aralığı da küçülür. Eğer $\vec{A}$, $[-1, 1]$ aralığında rastgele değerlere sahipse, kurdun bir sonraki konumu, mevcut konumu ile avın konumu arasında herhangi bir noktada bulunabilir.

3.3.3.2. Avları Arama

Gri kurtlar, genellikle alfa, beta ve delta kurtlarının konumlarına göre arama yapar. Sürüdeki her bir kurt, avı bulmak ve saldırmak amacıyla birbirlerinden ayrılır. Bu ayrışmayı matematiksel olarak modellemek için, $\vec{A}$ değerinin 1'den büyük veya -1'den küçük rastgele bir değer alması sağlanır. Bu durum, kurdun avdan uzaklaşmasını temsil eder. Sürüde gözlemlenen bu davranış, GWO algoritmasının global arama yapmasını mümkün kılar.

3.4. Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörün Tasarımı ve Önerilen Yöntem

Klasik sismik izolasyon tasarımında, izolasyon sistemi ve yapı tepkilerinin örtüşmesine dayanan iteratif bir metot kullanılır. Başlangıçta belirlenen izolatör deplasman değerlerine bağlı oluşturulan izolasyon parametreleri ile yapısal analizler yapılır. Analiz sonucunda elde edilen izolasyon deplasmanı ile başlangıçta belirlenen izolasyon deplasmanı kabul edilebilir bir yakınlığa geldiğinde uygun izolasyon parametreleri belirlenmiş olur. Ancak bu yöntem tekrarlı çözümlere dayanan iteratif bir metottur. Bulunan izolasyon parametreleri yapı ile uyumlu ve kabul edilebilir sonuçlar olsa da daha iyi yapı tepkilerinin elde edilebileceği izolasyon parametreleri vardır. Bu parametreleri bulmak için genellikle optimizasyon teknikleri üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur ((Çerçevik, Avşar, & Hasançebi, 2020), (Song, Zhai, Ma, Wang, & Pei, 2024), (Nigdeli, Bekdaş, & Alhan, 2014)). Bu çalışmalar örnek modellerin belirli sınırlar içinde en iyi yapı tepkilerini belirlemeyi amaçlayan çalışmalardır. Genellikle hedefleri ivmeyi en aza indirerek yapıda oluşacak hasarı da en aza indirilmesidir. Bu sayede klasik sismik izolasyon modelleme yöntemlerinde göz önüne alınmayan üst yapı tepkilerine göre en iyi izolasyon parametrelerini bulurlar.

Bu çalışmada ise 3 temel amaç bulunmaktadır. Bunlar sırası ile:

- Öncelikle tabanı izole örnek modellere giren enerji ile yapı tepkilerinin karşılaştırılmıştır. Bu sayede yapı tepkileri ve giren enerjinin bağlantısı ortaya konularak amaç fonksiyonunda kullanılabilirliği araştırılmıştır.
- İkinci amaç ise hazırlanan yazılım sayesinde elde edilen çok sayıdaki yapı tepkileri kullanılarak optimum izolasyon parametrelerinin belirlenebileceği grafik yöntem önerilmiştir. Bu yöntem sismik izolasyon tasarımcıları tarafından uygulanan iyileştirilmiş sismik izolasyon modellemeye benzer bir yöntemdir.
- Son aşamada ise Gri Kurt Algoritması (GWO) yardımı ile giren enerjinin amaç fonksiyonu olarak kullanılarak izolasyon parametreleri optimize edilmiştir. Grafik ve GWO kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

3.4.1. Giren Enerji ile Yapı Tepkileri Karşılaştırması

Çalışma kapsamında öncelikle giren enerji değişimleri yapı tepkileri ile kıyaslanmıştır. Bu amaçla klasik yöntemlere benzer şekilde izolasyon parametreleri değişken olarak incelenmiştir. Bu parametreler karakteristik dayanım (Q/W) ve izolasyon periyodudur (T_0). Ayrıca izolasyon akma deplasmanı (D_y) literatüre uygun olarak 0,01 metre ve 0,025 metre olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan değişkenler Tablo 3.4’da sunulmuştur.

Tablo 3.4. Çalışma kapsamında incelenen örnek üst yapı modelleri ve izolasyon parametreleri

Örnek Üst Yapı Modelleri	T_0 (sn)	D_y (m)	Q/W
3, 6, 9 katlı örnek modeller	2-4 saniye arası eşit artırımlı 20 parametre	0.01	0.03
			0.06
			0.09
			0.12
			0.15
		0.025	0.03
			0.06
			0.09
			0.12
			0.15

Tablo 3.4’da görüldüğü gibi izolasyon parametreleri akma deplasmanı 0,01 metre ve 0,025 metre ve Q/W oranı 0.03, 0.06, 0.09, 0.12 ve 0.15 olacak şekilde uygulanmıştır. İzolasyon periyodu için 2’den 4 saniye kadar olacak şekilde eşit artırımlı 20 parametre belirlenmiştir. Her akma deplasmanı için 5 adet Q/W oranı ve her Q/W oranı içinde 20 adet T_0 hesaplanmıştır. Bu sayede izolasyon tasarımına esas olan tüm değişkenlerin göz önüne alınması sağlanmıştır.

Seçilmiş olan izolasyon parametrelerinden Q/W oranından her örnek model için ağırlıkları belli olduğundan Q değerleri hesaplanır. T_0 ve W Denklem (2.14)’de yerine konularak k_2 hesaplanır. Bu parametreler yardımı ile Denklem (2.9)’da yerine yazılarak F_y hesaplanır. Bu değerler Şekil 2.9’da da görüldüğü üzere F_y/D_y oranı elastik rijitlik olan k_1 değerini vermektedir. Hesaplanmış olan k_2 ve k_1 değerleri oranlanarak akma sonrası rijitlik oranı hesaplanır. Bu hesaplanan değerler Sap2000 programında ilgili yerlere girilerek kurşun çekirdekli kauçuk izolator tasarımı gerçekleştirilmiş olur. Ayrıca Sap2000 programında doğrusal olmayan çözüm yapılmasına rağmen doğrusal analiz için kullanılan efektif rijitlik ve sönüm oranını da istemektedir. Burada literatürde önerildiği üzere etkin rijitlik için ikincil (elastik ötesi) rijitlik k_2 ve etkin sönüm için 0 değerleri veri olarak girilmiştir (NEHRP, 2015).

S Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: RUB1

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 650

Effective Damping: 0,05

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 2,

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 3000

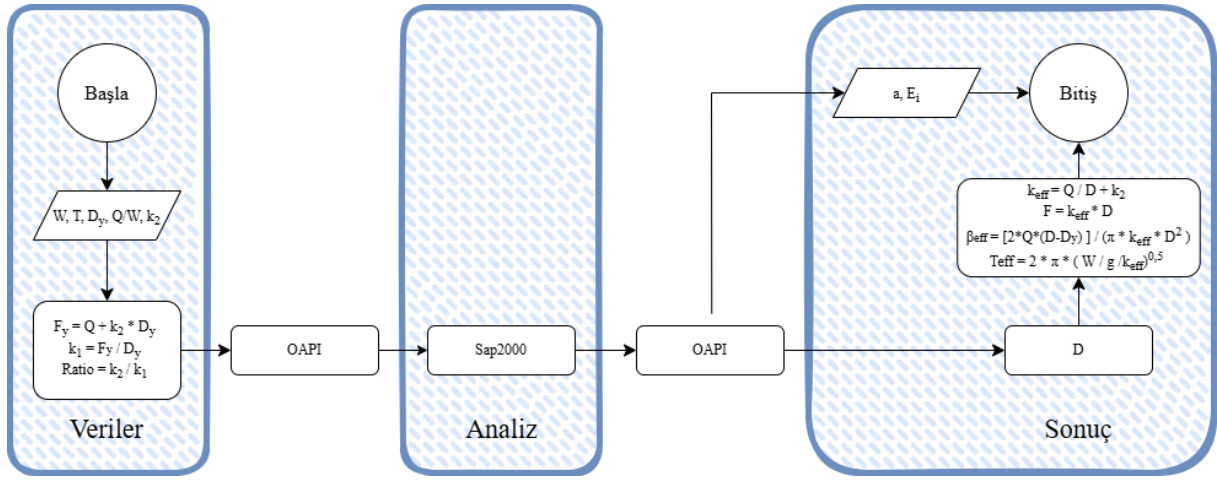
Yield Strength: 100

Post Yield Stiffness Ratio: 0,01

OK Cancel

Şekil 3.12. Sap2000 Programında Kurşun Çekirdekli Kauçuk İzolatörlerin Parametrelerinin Girilmesi

Tablo 3.4’de sunulan izolasyon sistemleri yerleştirilmiş örnek modeller önceki bölümde verilen 7 deprem ivme kaydı ile zaman tanım alanında analiz edilmiştir. İzolasyon parametreleri, örnek modeller ve farklı ivme kayıtlarını içeren toplam analiz sayısı 4200 adettir. Yüksek sayıdaki analizi yapabilmek için SAP2000 programına entegre bir Matlab yazılımı geliştirilmiştir. Yazılımın akış şeması Şekil 3.13’de sunulmuştur.



Şekil 3.13. İzolatör Tasarımı Akış Diyagramı

Şekil 3.13’de görüldüğü gibi izolasyon parametrelerinden SAP2000 doğrusal olmayan sismik izolasyon parametreleri üretildikten sonra bu değerler, OAPI (Open Application Programming Interface) aracılığıyla SAP2000 programına aktarılarak analiz başlatılmıştır. Analiz tamamlandığında yine OAPI yardımı ile izolasyon deplasmanı (D), giren enerji (E_i) ve çatı katı ivmesi (PRA) alınarak işlem tamamlanmıştır. Alınan sonuçlar Microsoft Excel’e aktırılarak karşılaştırılmıştır.

3.4.2. Grafik Yöntemle Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Klasik izolasyon tasarımında temel olarak iki parametre kontrol edilir. Bu parametreleri izolasyon deplasmanı (D) ve efektif sönüm oranıdır (β). Belirlenen D ve β kısıtları yapının yanal deplasmanına uygun ve seçilen izolatörün sönüm kapasitesi efektif sönüm limiti içinde kalıyorsa tasarım tamamlanabilir. Ancak üst yapının çatı katı ivmesinin azaltılması ikinci etapta amaçlanarak izolasyon tasarımı optimize edilebilir.

Önceki bölümde elde edilen yapı tepkileri kullanılarak ivme, deplasman ve sönüm grafikleri elde edilmiştir. Belirlenen kısıtlar kullanılarak grafiklerin üst üste çakıştırılması ile optimum izolasyon parametreleri (T_0 ve Q/W) elde edilmiştir. Önerilen grafik metodun işlem basamakları aşağıdaki maddelerde verilmiştir.

- Öncelikle yapının yanal deplasman kısıtı ve sönüm kapasitesi belirlenir.
- D ve β grafikleri T_0 ve Q/W ’ya bağımlı olarak çıkartılır.
- D ve β için uygun bölümler grafik üzerinden işaretlenir.
- İşaretlenen kısımlar üst üste çalıştırılarak uygun çözümler elde edilir.

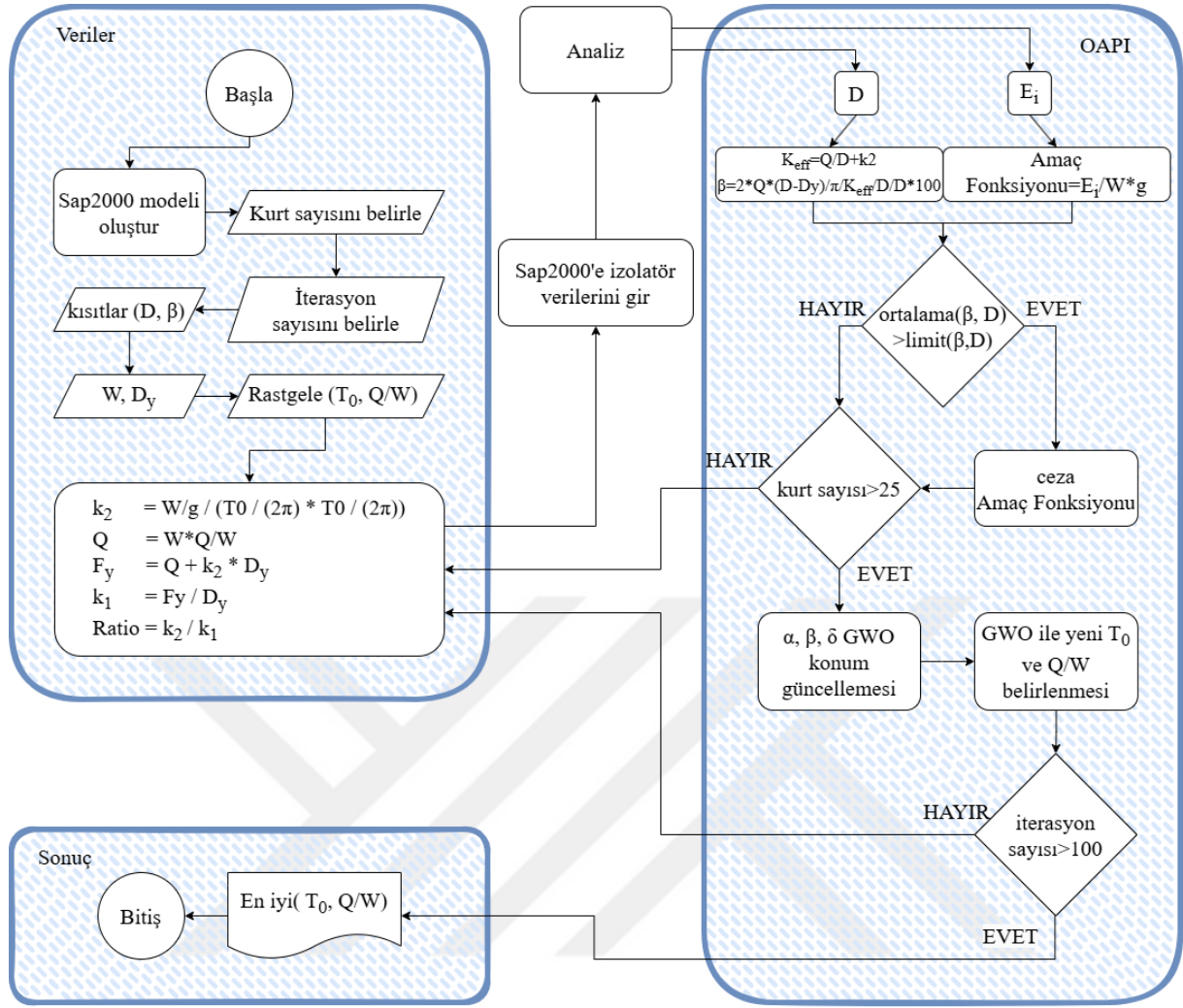
- Uygun çözümleri veren T_0 ve Q/W kombinasyonları çatı katı ivmesi grafiği üzerine yerleştirilir.
- Uygun çözümler içinde çatı katı ivmesini en az veren tasarım optimum izolasyon tasarımı olarak kabul edilir.

3.4.3. Gri kurt Algoritması ile İzolasyon Parametrelerinin Optimizasyonu

Önceki bölümde önerilen grafik metotla optimum izolasyon parametrelerini elde etmek mümkün olsa da kullanılan grafiklerdeki izolasyon parametreleri sınırlıdır. Örneğin Q/W için 5 ve T_0 için 20 parametrenin kombinasyonu ile elde edilen 100 izolasyon sistemi arasındaki optimum parametreler elde edilebilmektedir. Ancak bunların dışında kalan izolasyon parametreleri daha uygun yapı tepkileri üretebilir. Bu değerleri belirlemek amacı ile bu bölümde gri kurt algoritması kullanılmıştır. Arama uzayı önceki bölüme benzer olarak T_0 için 2-4sn ve Q/W ise 0.03-0.15 değerleri arasında seçilmiştir. Bu sayede belirlenen arama uzayı içindeki tüm kombinasyonlar incelenebilmiştir. Amaç fonksiyonu giren enerjidir. Optimizasyon kısıtları ise D için 40 cm ve β için %25 olarak belirlenmiş, akma deplasmanı 0.01 m için izolasyon parametreleri GWO ile optimize edilmiştir. Bu çalışmada limit dışına çıkan değerler için penaltı fonksiyonu benzer bir çalışmadan (Kaveh & Zakian, 2018) alınarak kullanılmıştır. Kullanılan penaltı fonksiyonu Eşitlik 3.36'da verilmiştir. Optimizasyon sürecinin akış şeması Şekil 3.14'de verilmiştir.

$$f_{penaltı} = \left(1 + \kappa_1 \cdot \frac{D_0}{D_{limit}}\right)^{\kappa_2} \quad (3.13)$$

Burada, κ_1 ve κ_2 sayıları sırasıyla 1 ve 2 olarak alınmıştır.



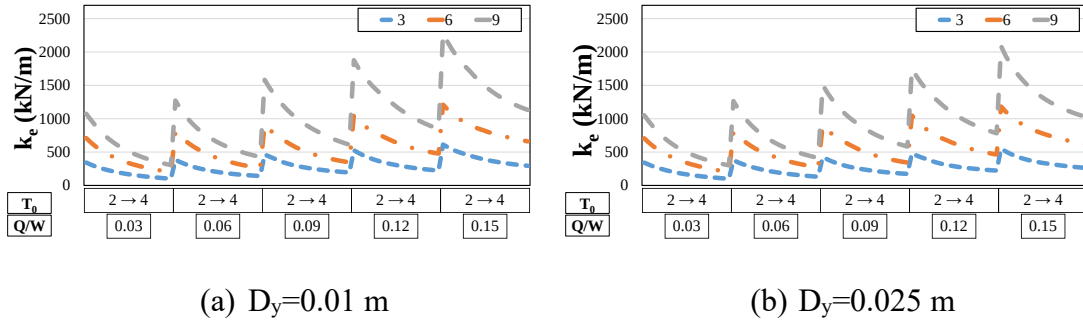
Şekil 3.14. Sismik izolasyon sistemlerinin parametrelerinin GWO ile enerji esaslı optimizasyonu akış şeması

4. BULGULAR

Çalışmanın bulguları 3 bölümde sunulmuş ve tartışılmıştır. Öncelikle giren enerjinin yapı tepkileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. İkinci bölümde, optimum izolasyon parametrelerini belirlemek için bir grafik yöntem önerilmiş ve son bölümde GWO ile bulunan optimum izolasyon parametreleri karşılaştırılarak enerji esaslı yöntemin avantajları ortaya konulmuştur.

4.1. Sismik İzolasyonlu Yapı Tepkilerinin Giren Enerji ile Kıyaslanması

Kurşun çekirdekli kauçuk izolasyonlu, 3, 6 ve 9 katlı çelik çerçevelerde giren enerjinin değişiminin araştırıldığı bu çalışmada; izolasyon sisteminin esas değişkenleri D_y , Q/W ve T_0 olarak belirlenmiştir. Ayrıca giren enerjinin uzak ve yakın saha ivme kayıtlarında değişiminin incelenmesi amacı ile Tablo 3.3’de verilen ivme kayıtları ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile analizler yapılmıştır. Kat yükseklikleri farklı olan 3 tip çerçeve ile analizler tekrarlanarak giren enerjinin maksimum yapı tepkileri ile karşılaştırılması incelenmiştir. 3 farklı kat sayısına sahip örnek modellerin birbirleri ile kıyaslanması amacı ile T_0 2-4sn arasında eşit artımlı 20 değer ve Q/W 0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15 olacak şekilde 5 değer seçilmiştir. Farklı kütleye sahip örnek modeller için aynı T_0 değerlerini elde etmek için izolasyon efektif rijitliği Şekil 4.1’deki gibi modellenmiştir. Bu sayede farklı katlara sahip modellerin aynı T_0 değerleri için karşılaştırma yapılabilmiştir.



Şekil 4.1. $D_y=0.01$ m (a) ve $D_y=0.025$ m (b) akma deplasmanına göre örnek modellerin efektif rijitlik değeri

Çalışma kapsamında, 20 farklı T_0 , 5 farklı Q/W ve 2 farklı D_y değerlerinin kombinasyonlarını içeren izolasyon sistemleri hazırlanmıştır. Şekil 4.1’de düşey eksen efektif rijitliği gösterirken yatay eksen Q/W değerlerini ve 2-4 sn arasındaki T_0 değerleri göstermektedir. Eşit T_0 ve Q/W değeri elde etmek amacı ile tabi olarak yüksek kütleli 9 katlı

modelde yüksek efektif rijitlik bulunurken düşük kütleli 3 katlı yapıda düşük efektif rijitlik bulunmuştur.

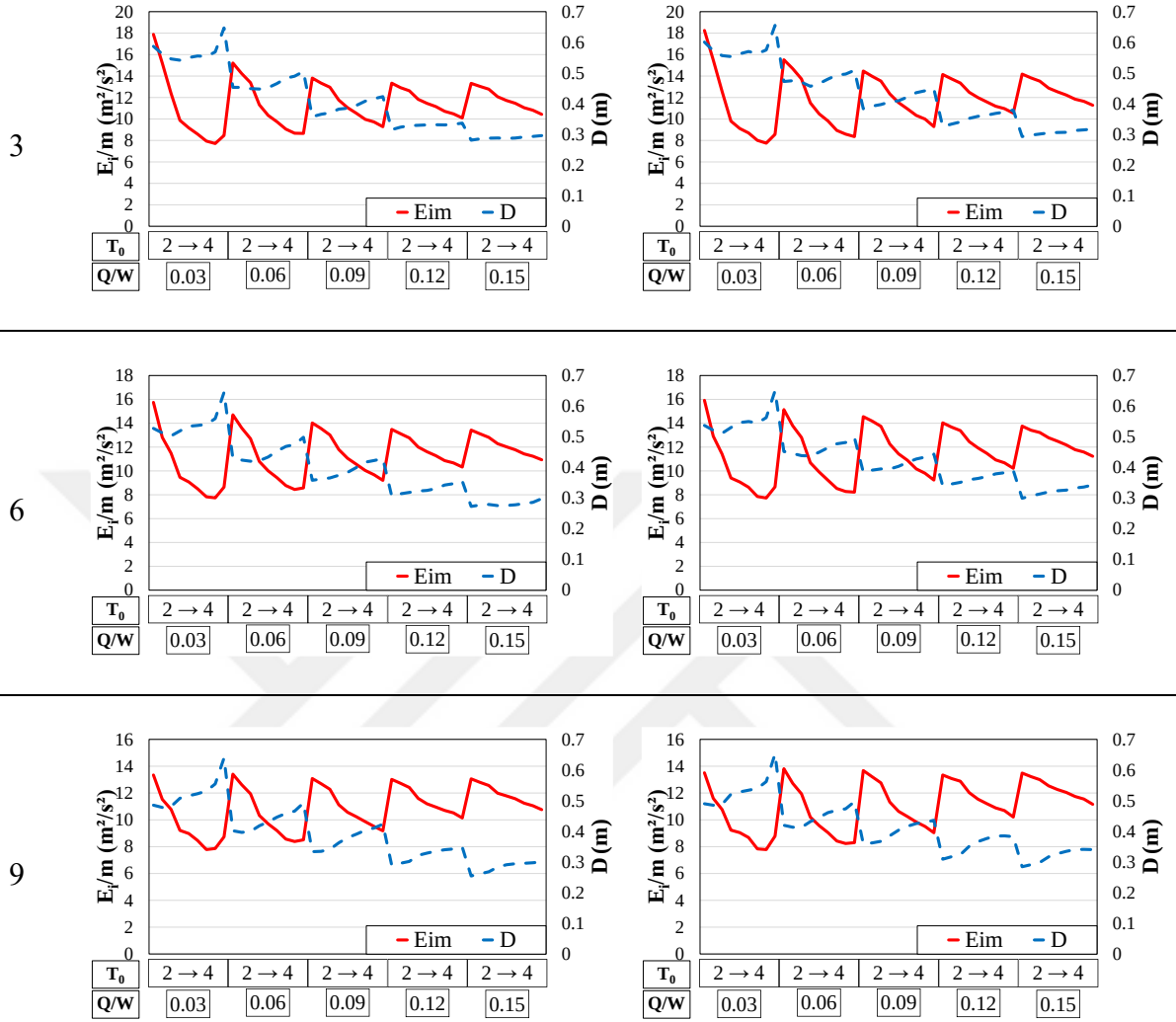
Çalışma bulgularında öncelikle giren enerji ve yapı tepkileri birbirleri ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama öncelikle örnek modeller ve akma deplasmanlarına göre verilmiştir. Sonrasında aynı T_0 ve Q/W sahip parametreler için katların birbirlerine göre oluşturdukları yapı tepkilerin incelenmiştir. Ayrıca deprem ivme kayıtlarının oluşturdukları yapı tepkileri araştırılmıştır.

4.1.1. Giren Enerji ile Yapı Tepkileri Karşılaştırmaları

Bu bölümde, üç farklı kat yüksekliğine (3, 6 ve 9 kat) sahip akma deplasmanının 0,01m ve 0,025m olduğu değerlerde çelik çerçeveli yapıların giren enerji ile izolatör deplasmanları, maksimum çatı ivmesi, sönüm oranı ve taban kesme ile karşılaştırılmaktadır. Yatay ekseninde izolasyon sistemi değişkenleri her Q/W değeri altında T_0 değerleri yer almakta, sol düşey ekseninde giren enerjinin kütleyle oranı (E_i/m) gösterilmektedir. Sağ düşey ekseninde ise farklı yapı tepkileri belirtilmektedir. Çizilen grafikler 7 deprem kaydının ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

4.1.1.1. Giren Enerji ile Deplasman Karşılaştırmaları

Farklı kat adetleri ve D_y değerlerine göre giren enerji/kütle oranı (E_i/m) ile deplasman (D) değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2'de, Q/W ve T_0 değişkenlerinin etkileri analiz edilerek, giren enerji/kütle ile deplasman arasındaki ilişki ortaya konulmaktadır.



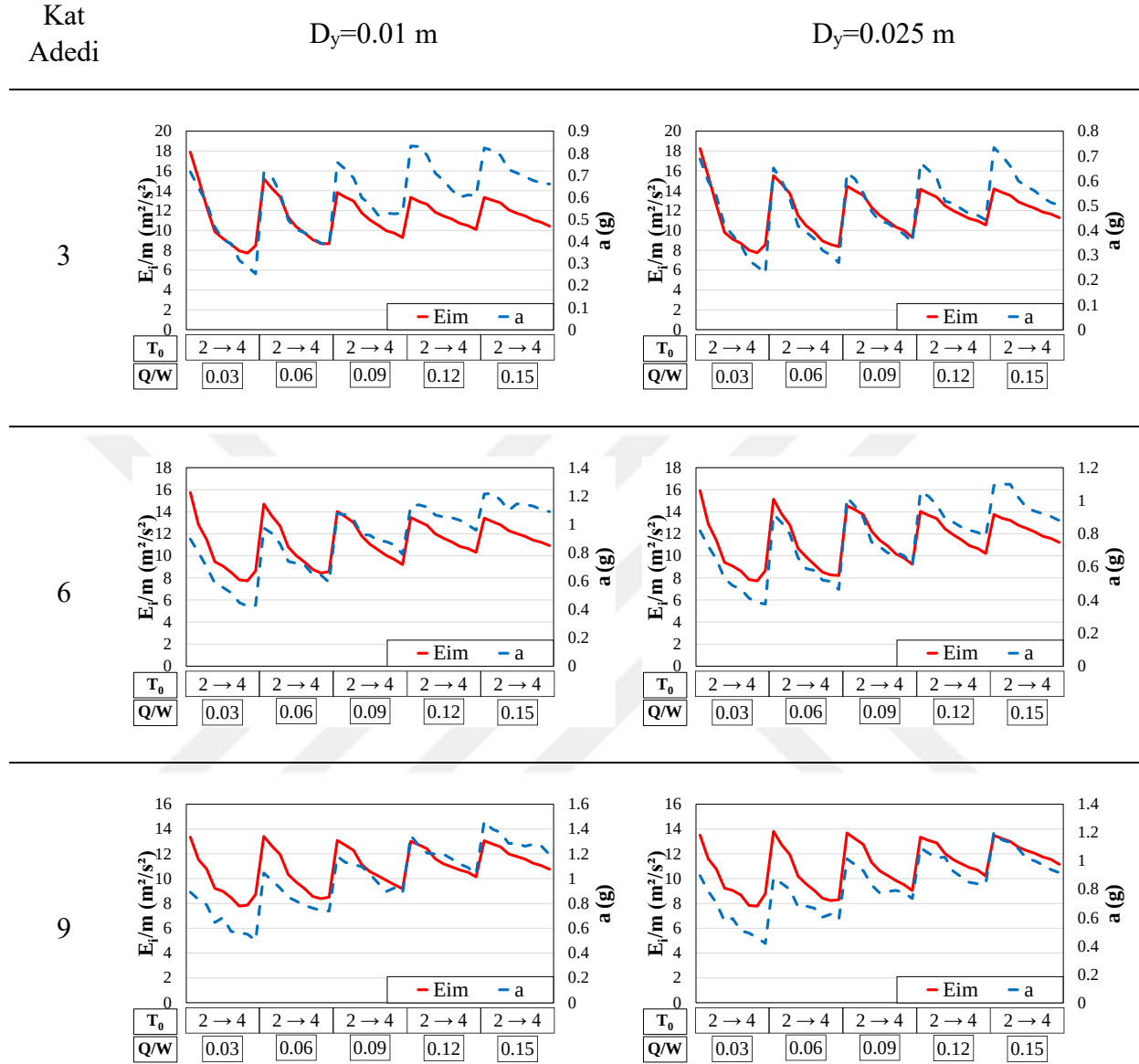
Şekil 4.2. Giren enerji ile deplasman karşılaştırmaları

Şekil 4.2'ye göre tüm Q/W değerlerinde T_0 artışı ile E_i/m azalım gösterirken D artış göstermektedir. Yüksek Q/W değerlerinde T_0 'ın artışı ile E_i/m azalımı düşük Q/W değerlerine kıyasla daha yavaş olmuştur. İzolasyon sisteminin yatay rijitliği temsil eden Q/W arttıkça giren enerjinin arttığı belirlenmiştir. D_y 'nin değişimi, E_i/m ve D üzerinde kayda değer bir etki oluşturmada da E_i/m ve D , D_y 'nin 0.025 olduğu durumda daha yüksek olduğu görülmüştür.

4.1.1.2. Giren Enerji ile Çatı Katı İvmeleri Karşılaştırılması

Literatüre uygun olarak bu çalışmada da çatı katı ivmesi (a) ile giren enerji karşılaştırmaları yapılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda en büyük ivmenin tüm örnek modellerde katlara göre en büyük geldiği görüldüğünden çatı katı ivmesi kullanılmıştır. Sismik

izolasyonlu yapılarda da yapının ivmesinin azaltılması temel hedeflerden bir tanesidir. Şekil 4.3'te E_i/m ve a farklı izolasyon parametrelerine göre birbirleri ile kıyaslanmıştır.



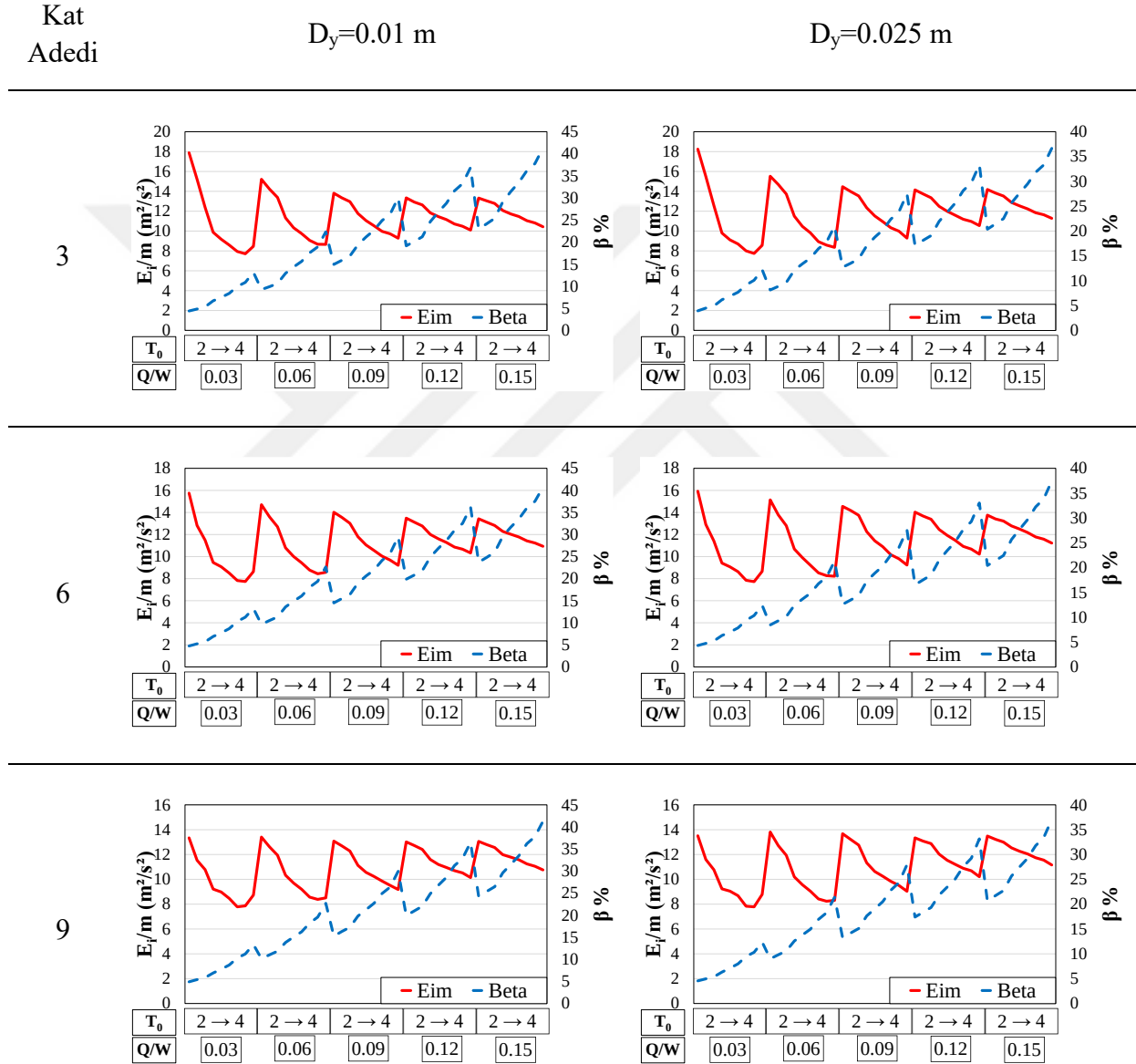
Şekil 4.3. Giren enerji ve ivme karşılaştırılması

Tabanı ankaste yapılara giren enerjinin miktarı arttıkça yapıda oluşacak etkilerin artacağı önceki çalışmalarda gösterilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde T_0 değişken olduğunda, periyodun artışı E_i/m ve ivme (a) değerlerinde paralel bir düşüşe yol açmıştır. Bu eğilim, uzun periyotların enerji ve ivme üzerinde azaltıcı etkisi olduğunu göstermektedir. Q/W değişken olduğunda, Q/W oranı arttıkça ivme değerinde artış gözlenmiş, ancak E_i/m üzerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. D_y değişken olduğunda, D_y 'nin 0.025m olduğu durumlara ivmenin bir miktar attığı tüm Q/W ve a değerlerinde tespit edilmiştir. Bu kıyaslamalara göre tabanı ankastre yapılarda olduğu gibi izolasyonlu yapılarda da a ve E_i/m 'nin farklı kat ve D_y değerleri

için benzer değişimler gösterdiği görülmüştür. Sonuçta E_i/m değerinin ivme parametresi gibi yapısal tasarım kontrolünde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

4.1.1.3. Giren Enerji ile Sönüm Karşılaştırılması

Yapılara sismik izolasyon eklenmesinin temel amaçlarından bir tanesi sönüm kapasitesinin artırılmasının amaçlanmasıdır. Bu sebeple efektif sönüm (β) ile E_i/m değişimleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.4).



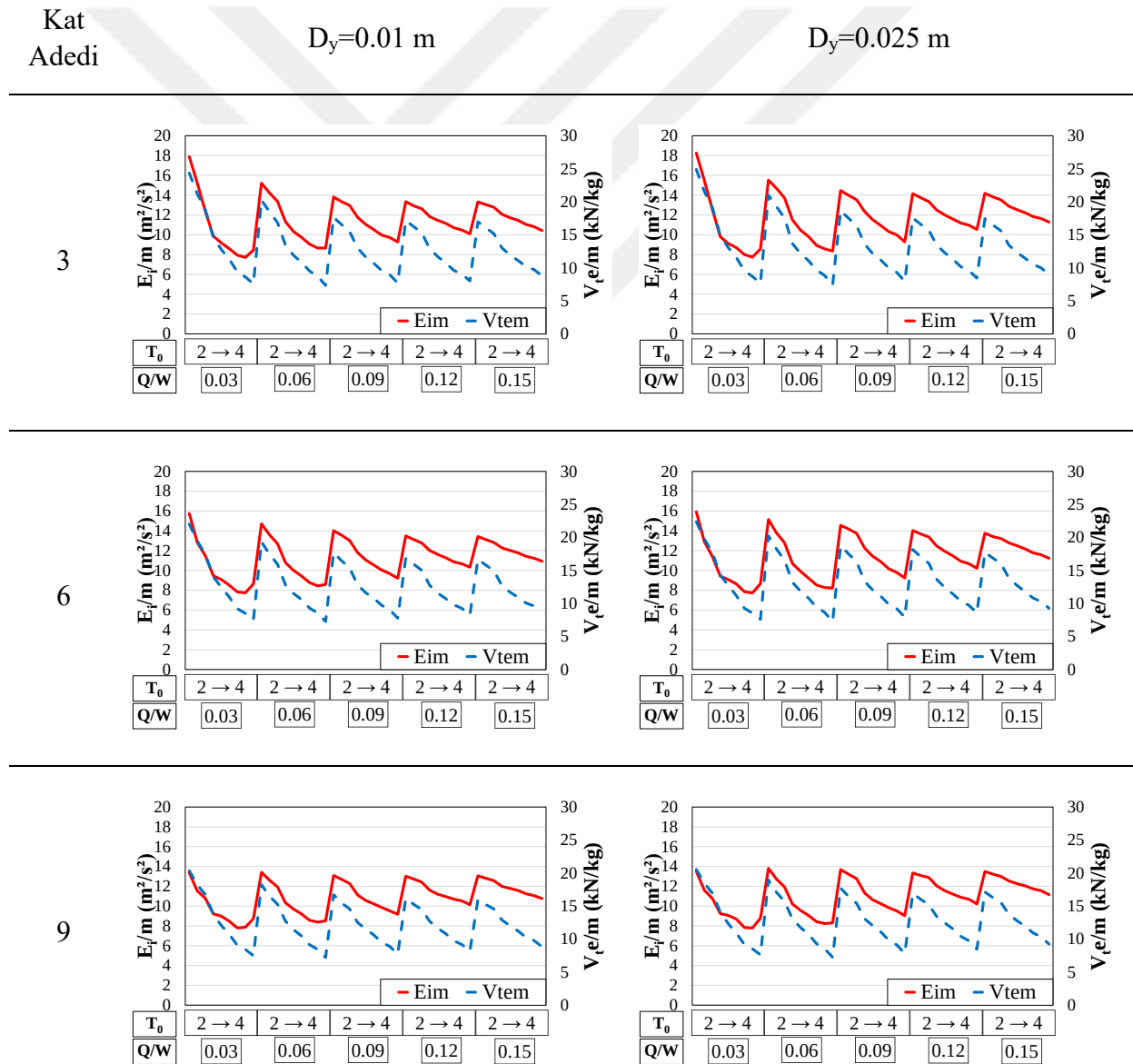
Şekil 4.4. Giren enerji ile sönüm karşılaştırılması

Çalışma kapsamında, belirlenen T_0 ve Q/W değerleri için β değeri %2'den %40'a kadar değişim göstermiştir (Şekil 4.4). T_0 değişken olduğunda, T_0 arttıkça E_i/m azalırken, sönüm oranı (β) artış göstermiştir. Bu durum, uzun periyotların enerji azalmasını sağlarken sönüm kapasitesini artırarak sistemin daha etkili çalışmasına olanak tanıdığını göstermektedir. Q/W

değişken olduğunda, artan Q/W oranının β üzerinde bir artış yarattığı, ancak E_i/m üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmadığı görülmüştür. D_y kıyaslandığında, D_y 'nin artışı β değerinde düşüşe neden olmuştur. Bu durum, D_y 'nin artmasıyla izolatorün sönüm kapasitesinin azaldığını göstermektedir. Sonuçta β ve E_i/m ters orantılı bir değişim gösterdiği belirlenmiş, E_i/m azalması için β değerinin artırılması gerektiği ortaya konulmuştur.

4.1.1.4. Giren Enerji ile Taban Kesme Kuvvetlerinin Karşılaştırılması

Yapılarda, taban kesme kuvvetleri (V_{te}/m) deprem sırasında zeminin yapıya ilettiği kuvvetlerdir. Sismik izolasyonlu yapılar, tabanı ankastre yapılara göre daha az taban kesme kuvvetine maruz kalırlar. Bu sayede de daha az hasar almaları beklenir. Şekil 4.5'te (V_{te}/m) ile E_i/m kıyaslanması sunulmuştur.

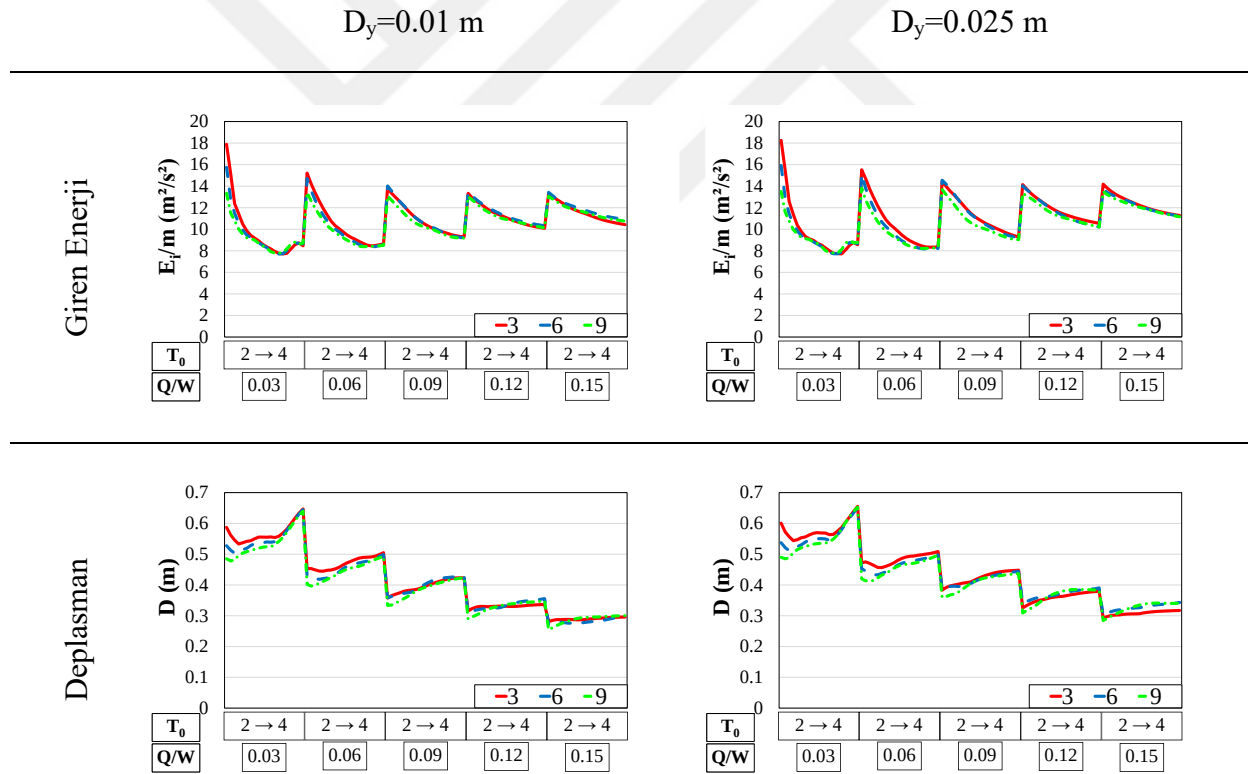


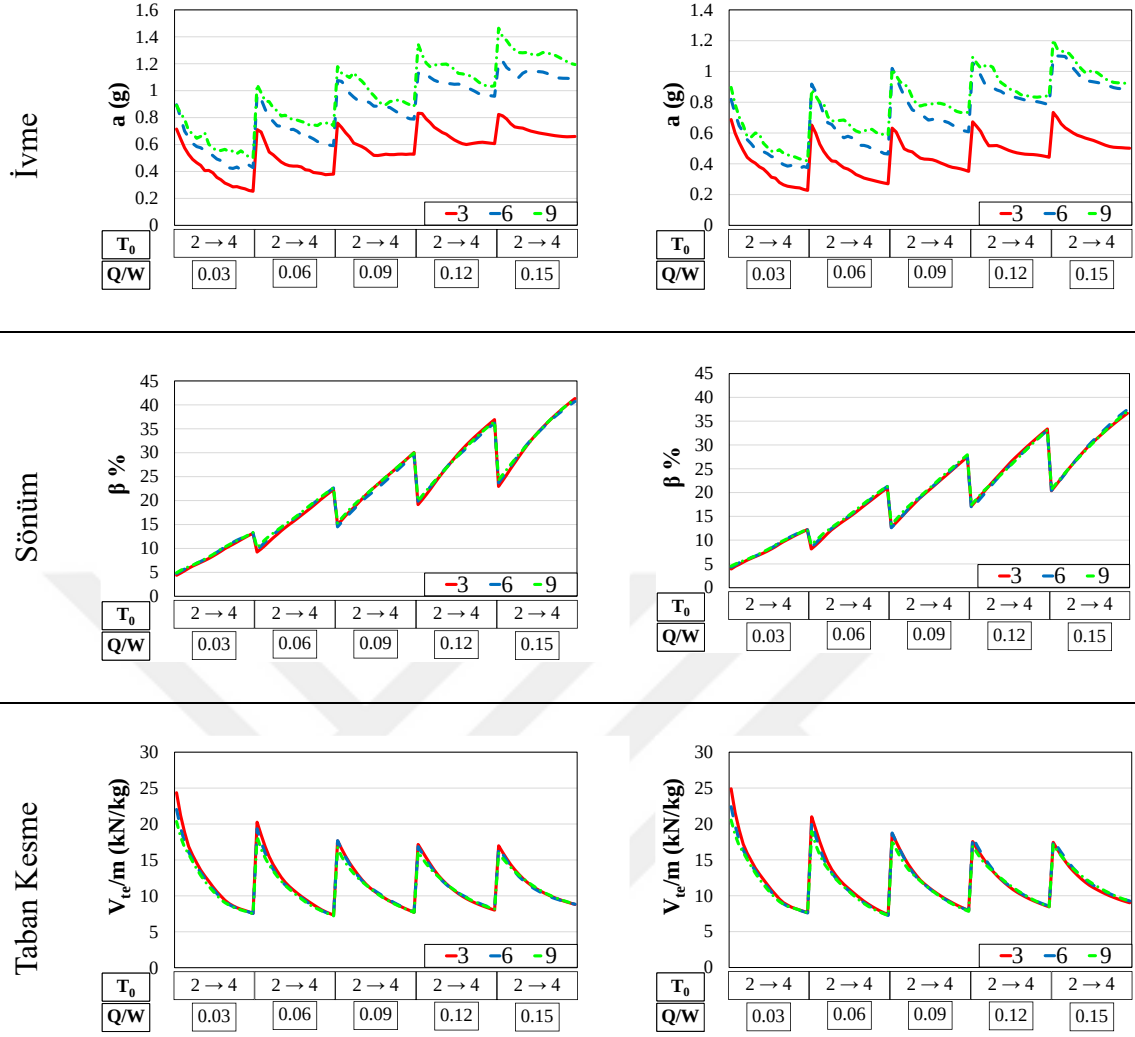
Şekil 4.5. Giren enerji ile taban kesme karşılaştırılması

Beklendiği gibi V_{te}/m ile E_i/m farklı izolasyon kombinasyonlarında benzer değişim göstermektedir (Şekil 4.5). T_0 değişken olduğunda, artan T_0 ile E_i/m ve V_{te}/m değerlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu durum, uzun periyotların yapı üzerindeki sismik kuvvetleri ve yanal yükleri azalttığını göstermektedir. Q/W değişken olduğunda, Q/W oranındaki değişimin V_{te}/m üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. V_{te}/m , D_y ve kat değişimlerinde ciddi bir değişim göstermemiştir.

4.1.2. Katlara Göre Yapı Tepkilerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde, yapının farklı D_y değerlerine göre, her Q/W altında buna bağlı olarak her T_0 değerleri için 3, 6 ve 9 katlı yapıların yapı tepkilerini karşılaştırmaktadır. Şekil 4.6, her bir parametre değişiminin yapı üzerindeki etkilerini görselleştiren çeşitli alt grafiklerden oluşmaktadır.





Şekil 4.6. Katlara göre yapı tepkilerinin karşılaştırılması

Şekil 4.6 incelendiğinde giren enerji, izolasyon deplasmanı, sönüm ve taban kesme kuvvetleri, izolasyon sistemlerinin belirli T_0 ve Q/W değerlerimde katlara bağlı olarak değişim göstermemiştir. Ancak ivme değerlerinin T_0 ve Q/W değerleri sabit tutulsa da değişiklik gösterdiği, 3 katlı modelde düşük çıktığı, 6 ve 9 katlı yapılarda birbirlerine benzer şekilde yüksek geldiği belirlenmiştir.

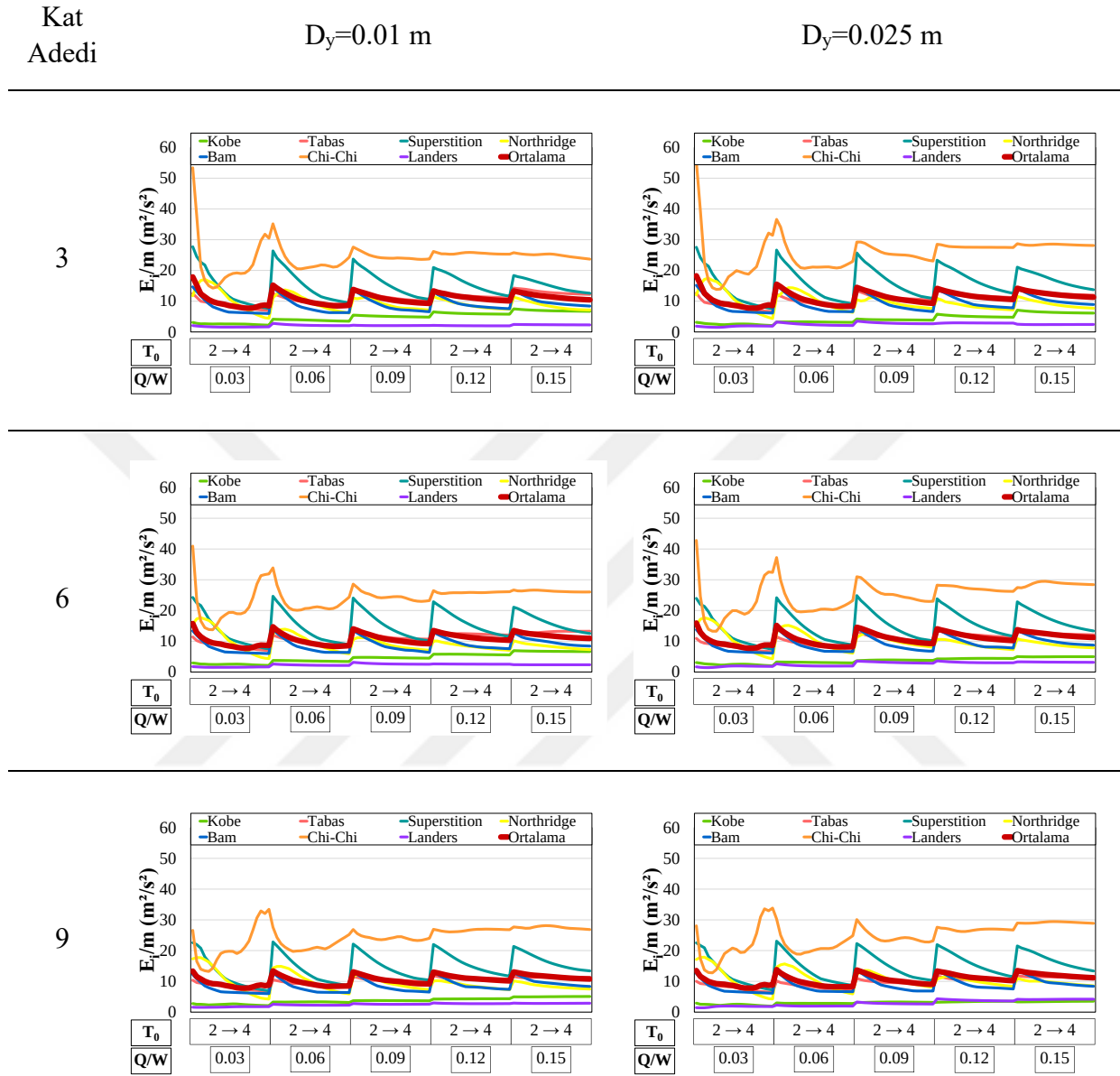
4.1.3. Depremlere Göre Yapı Tepkilerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde kullanılan deprem ivme kayıtlarının izolasyon parametrelerine göre değişimleri incelenmiştir.

4.1.3.1. Depremlere Göre Giren Enerjilerin Karşılaştırılması

Seçilen depremler doğrultusunda tekrarlı analizlerle elde edilen giren enerjinin kütleye oranı (E_i/m) Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu grafikler, Q/W oranı ve T_0 değerlerine bağlı olarak

seçilen izolat6rler ile farklı kat sayılarına sahip yapı modellerinin enerji davranışlarını karşılaştırmaktadır.



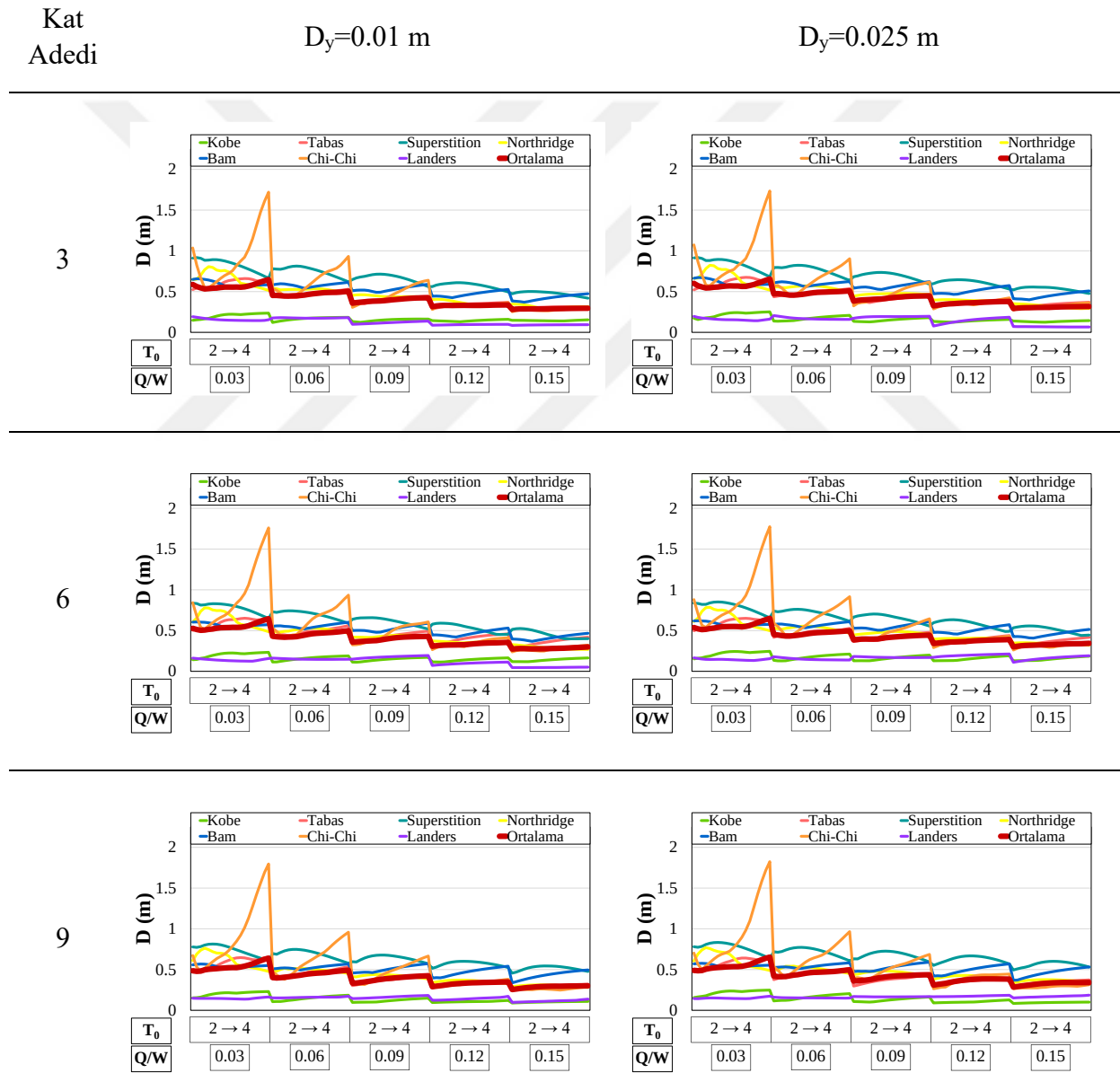
Şekil 4.7. Depremlere göre giren enerjinin kütleyle oranı

Şekil 4.7'ye göre, en büyük E_i/m değerini Chi-Chi ivme kaydı, en düşük E_i/m değerini ise Landers ivme kaydı vermektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 3.6'daki enerji spektrumları birlikte incelendiğinde, spektral hız ve giren enerji arasında belirgin bir uyum olduğu fark edilmektedir. Spektral hız grafiğindeki yüksek olarak görülen depremlerin, giren enerjinin kütleyle oranında da benzer bir yükseklikle örtüştüğü görülmektedir. Bu durum, deprem kaynaklı dinamik etkilerin hem hız bileşeni hem de enerji aktarımı bağlamında birbirini desteklediğini ve giren enerji hesabında hız spektrumunun kullanılabileceğini belirtmektedir. Ayrıca, farklı katlardaki

örnek modeller için ortalama E_i/m değerleri birbirlerine benzer gelmektedir. $0.025 D_y$ olan izolasyon sistemlerinde tüm ivme kayıtları ve ortalamalar için $0.01 D_y$ 'ye sahip sistemlere göre bir miktar yüksek E_i/m değerleri elde edilmiştir.

4.1.3.2. Depremlere Göre Deplasmanların Karşılaştırılması

Seçilen depremler doğrultusunda yapılan tekrarlı analizler sonucunda elde edilen deplasman (D) değerleri Şekil 4.8'de sunulmuştur. Bu grafikler, Q/W oranı ve T_0 değerlerine bağlı olarak seçilen izolatörlerin, farklı depremlerdeki yapı modellerindeki deplasman davranışlarını göstermektedir.

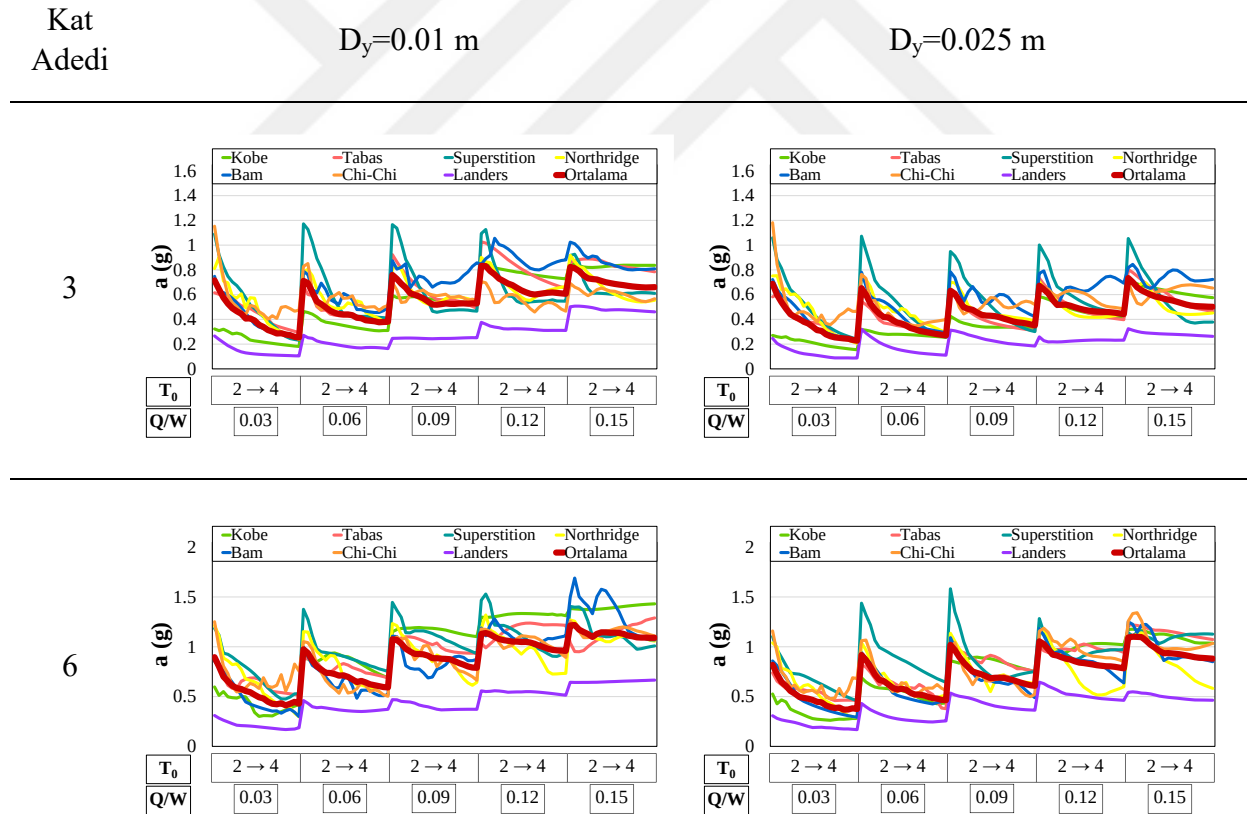


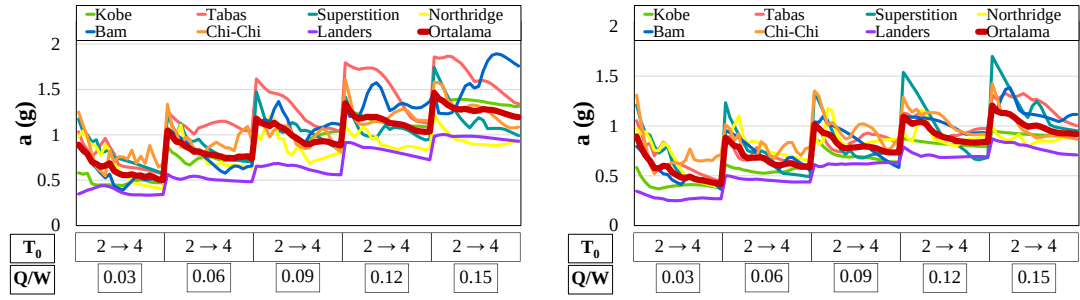
Şekil 4.8. Depremlere göre deplasmanların karşılaştırılması

Şekil 4.8 incelendiğinde, tüm kat adedi ve D_y kombinasyonlarında, Q/W oranı arttıkça deplasmanların azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. T_0 'ın artışı da deplasmanlarda yükseliş eğilimi yaratmıştır. Bununla birlikte, Chi-Chi depremi diğer depremlerden oldukça yüksek deplasman değerleriyle ayrılmaktadır. Özellikle $Q/W=0.03$ ve $T_0=4$ sn için deplasmanlar 1.7 m'ye kadar çıkmış, oysa genellikle deplasmanlar 0.5 m civarında elde edilmiştir. Bu durum, belirli depremlerin yapıya daha büyük deplasman etkisi oluşturduğunu ve sonuçların giren enerji ile uyumlu olduğunu göstermektedir. D_y değerinin artışı, deplasman değerinde az bir miktar azalmaya neden olsa da genel eğilimleri değiştirmemiştir.

4.1.3.3. Depremlere Göre İvmelerin Karşılaştırılması

Çatı katı ivmesi tüm yapılarda olduğu gibi sismik izolasyonu yapılarda da önemli bir kontrol parametresidir. Konvansiyonel yapılara kıyasla sismik izolasyonun yapılar da ivme sağlanan periyot artışı ile daha düşük çıkmaktadır. 7 farklı ivme kaydına göre çatı katı ivme değişimleri ve ortalamaları Şekil 4. 9 da verilmiştir.



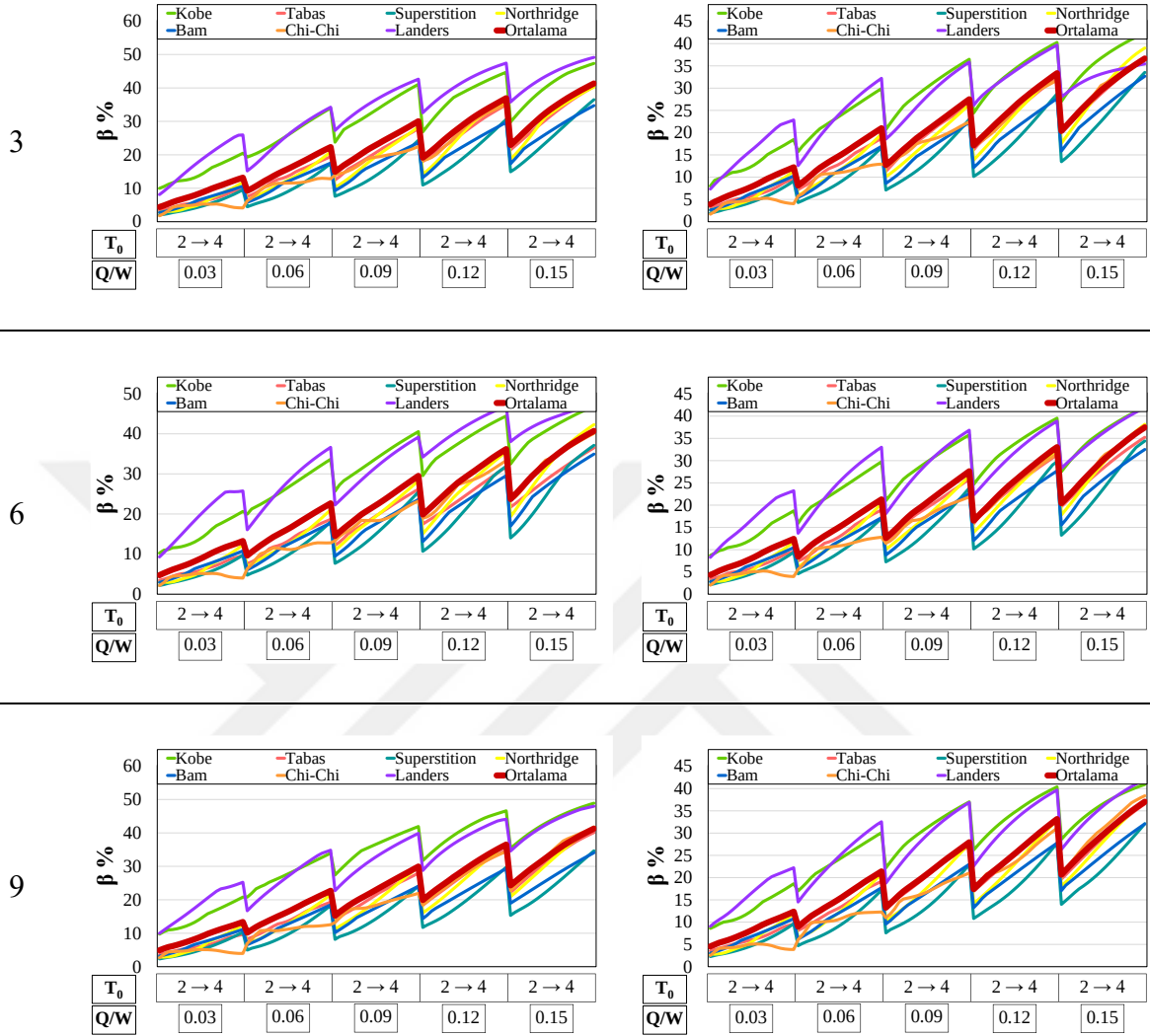


Şekil 4.9. Depremlere göre ivmelerin karşılaştırılması

Şekil 4.9 incelendiğinde tüm kat adedi ve D_y kombinasyonlarında, Q/W oranı arttıkça ivme değerlerinin arttığı gözlenmiştir. T_0 değerinin artışı, genellikle ivmelerde belirgin bir düşüş eğilimi yaratmıştır. D_y 'nin artışı, ivmelerde artış eğilimi göstermiş, ancak bu artış genelde sınırlı kalmıştır. Superstition depremi, tüm kombinasyonlarda daha yüksek ivme değerleriyle dikkat çekerken, diğer depremler daha düşük ve düzenli bir dağılım sergilemiştir. Ortalama değerler, tüm kombinasyonlarda genel eğilimleri yansıtmış, ancak deprem türüne bağlı uç değerler, genel tabloyu etkileyen temel faktörlerden biri olmuştur. Bam, Superstition ve Tabas depremleri genellikle ortalamanın üzerinde kalan ivme değerleri göstermiştir. Buna karşın, Landers ve Northridge depremleri ortalamanın altında kalan daha düşük ivme değerleri sergilemiştir. Deprem ivme kaydı ve izolasyon parametreleri, çatı katı ivme değerlerini ciddi oranda değiştirdiği belirlenmiştir.

4.1.3.4. Depremlere Göre Sismik İzolasyon Sisteminin Sönümlerin Karşılaştırılması

Sismik izolatörler, kauçuk içerikleri gereği yapıda ek sönüm kapasitesi kazandırır. Ancak izolatörlerin yapıları gereği sisteme sağlayabilecekleri bir sönüm kapasiteleri vardır. Bu sebeple sismik izolasyon modellemede sönüm incelenen bir parametredir. Şekil 4.10'da deprem ivme kayıtlarına göre sismik izolasyon sisteminin sönüm değişimi verilmiştir.



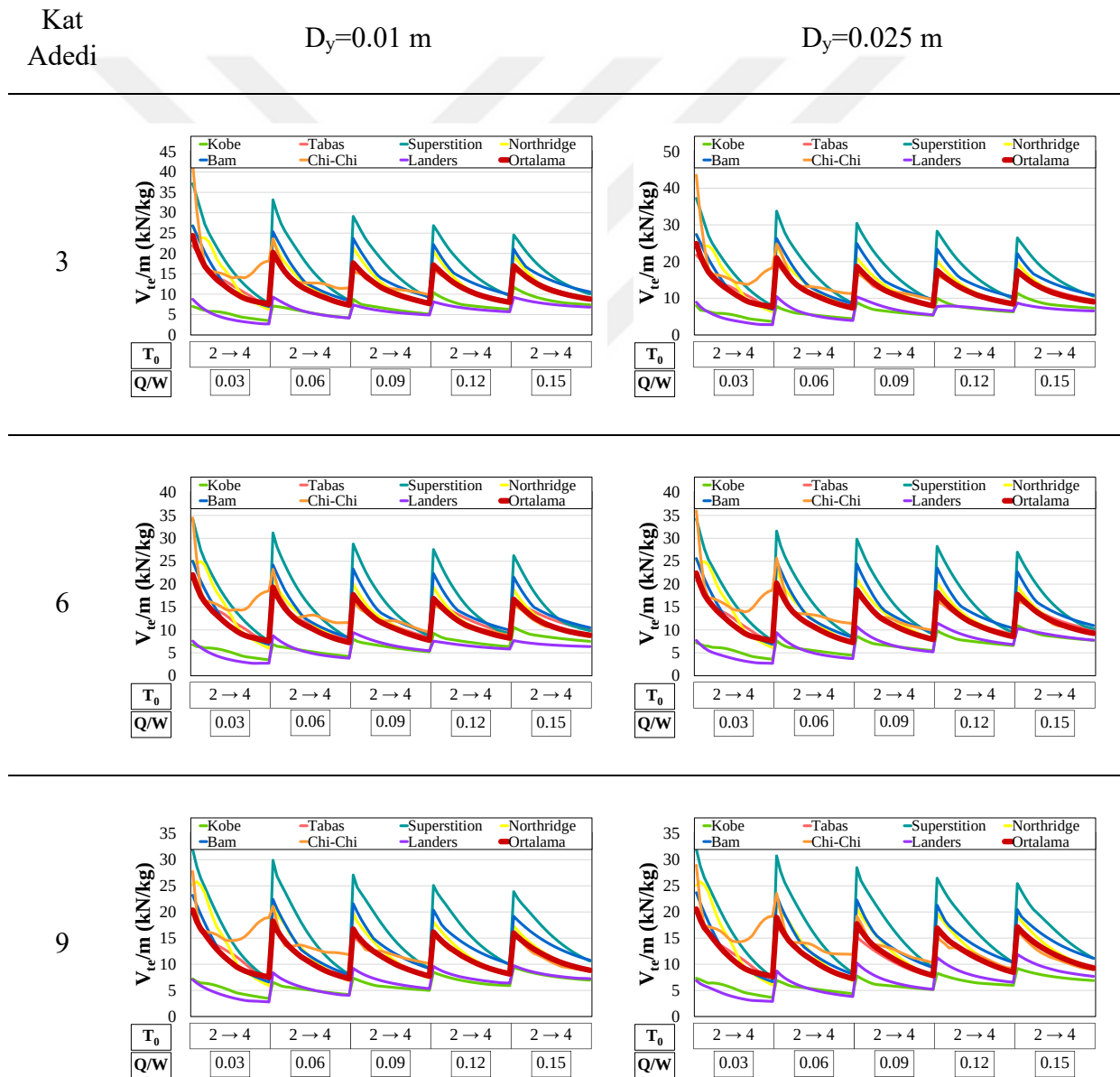
Şekil 4.10. Depremlere göre sismik izolasyon sisteminin sönümlerin karşılaştırılması

Şekil 4.10 incelendiğinde T_0 ve Q/W oranının artmasıyla sönüm değerleri düzenli bir şekilde artış göstermiştir. Düşük Q/W oranlarında sönüm artışı daha düşük bir hızla gerçekleşirken, yüksek Q/W oranlarında artış daha hızlı olmuştur. D_y 'nin artışı, sönüm değerlerinde belirgin bir artış oluşturmada da 0.01 D_y olan durumlarda daha yüksek β değerleri bulunmuştur. Landers ivme kaydı, tüm kombinasyonlarda diğer depremlere göre daha yüksek sönüm değerleri sergilemiştir. Bu da düşük E_i/m ve a değerlerine sahip depremlerde β yükseldiğini göstermektedir. Grafiğe göre, ortalamanın altında kalan β değerleri genellikle Bam, Superstition, Chi-Chi ve Tabas depremlerinde gözlemlenirken, ortalamanın üzerinde kalan β değerleri Landers, Northridge ve Kobe depremlerinde belirginleşmiştir. Bu eğilim,

farklı Q/W oranlarında da tutarlılık göstermiş, özellikle yüksek Q/W değerlerinde ortalamanın üzerinde kalan depremlerin β değeri daha yüksek hale gelmiştir.

4.1.3.5. Depremlere Göre Taban Kesmenin Karşılaştırılması

Şekil 4.11’de kullanılan T_0 ve Q/W değerlerine, deprem ivme kayıtlarına, D_y ve kat adedine göre taban kesme/kütle (V_{te}/m) değişimleri karşılaştırılmıştır. Sismik izolatörlerin amacı, yapıya yatayda hareket kabiliyeti sağlamaktır. Ancak yapının yatayda sınırsız hareket etmesi mümkün değildir. Yapının yatayda hareket etme talebini oluşturan ve izolasyon sistemini zorlayan kuvvetin taban kesme kuvveti olduğu için ivme kayıtlarının oluşturdukları taban kesme kuvvetleri incelenmiştir.



Şekil 4.11. Depremlere göre taban kesmenin karşılaştırılması

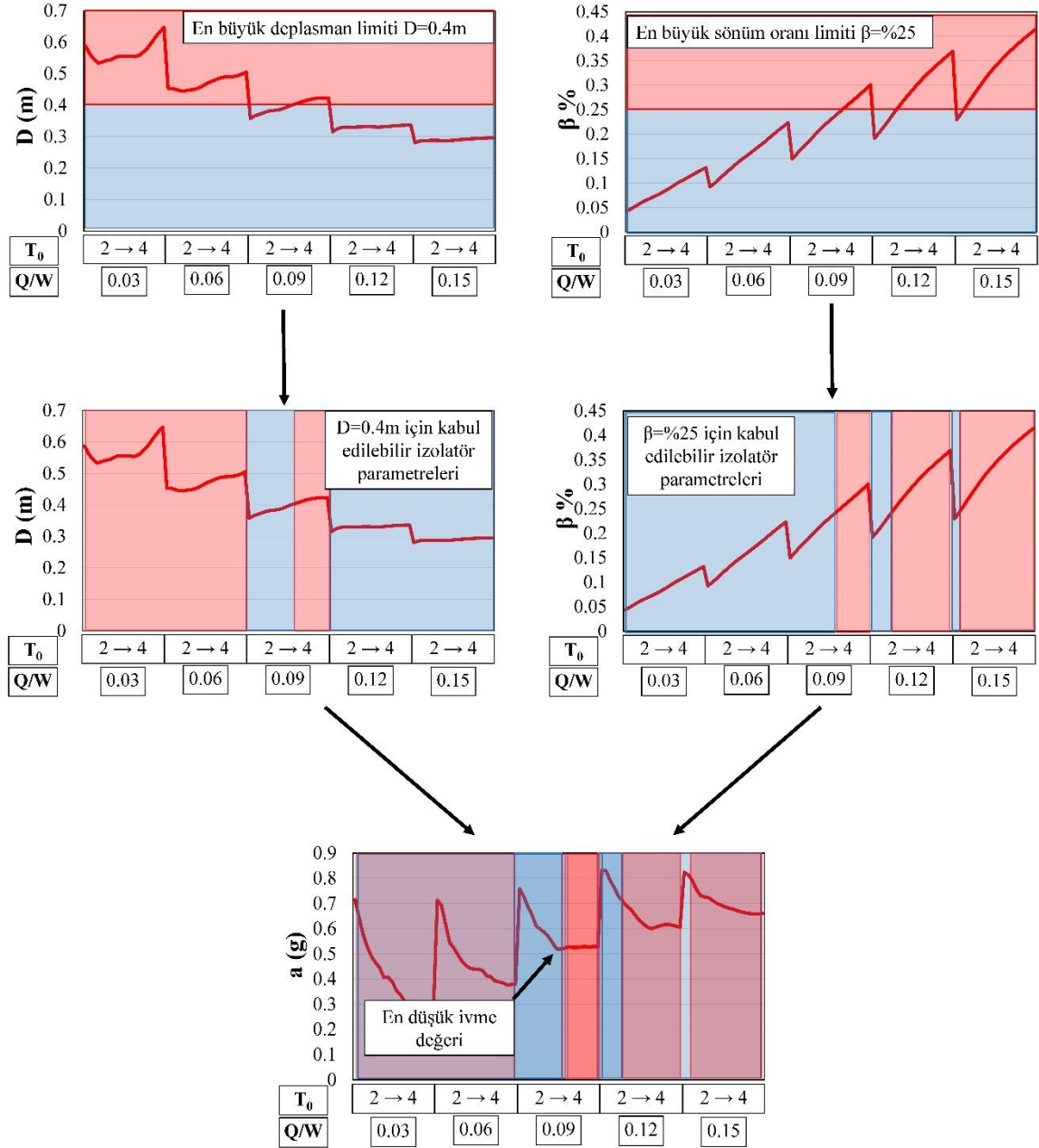
Şekil 4.11’de, T_0 ve Q/W oranı arttıkça taban kesme/kütle oranı (V_{te}/m) değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Superstition depremi, tüm kombinasyonlarda diğer depremlere kıyasla daha yüksek taban kesme kuvvetleriyle ayrılmıştır. Kat adedi arttıkça V_{te}/m değerleri genelde azalmış, bu da yüksek katlı yapıların taban kesme kuvvetlerini daha iyi yönetebildiğini göstermektedir. Ortalama eğriler, tüm kombinasyonlarda düzenli eğilimleri temsil ederek genel sonuçları özetlemektedir.

4.2. Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi için Önerilen Grafik Yöntem

Analizi yapılan sismik izolasyonlu örnek modellerin 7 deprem ivme kaydı analizlerinin ortalamaları önceki bölümlerde sunulmuştur. Bu bölümde belirlenen yapı tepkileri için optimum izolatör parametrelerinin belirlenmesinde grafik tabanlı bir çözüm önerilmiştir.

Sismik izolasyon tasarımlarının yapı ve deprem ivme kaydına en uygun belirlenebilmesi için pek çok araştırmalar yapılmıştır ((Çerçevik, Avşar, & Hasaıçebi, 2020), (Song, Zhai, Ma, Wang, & Pei, 2024), (Nigdeli, Bekdaş, & Alhan, 2014)). Bu araştırmaların çoğu, sezgisel optimizasyon algoritmalarının güçlü sonuç bulma yeteneklerine dayanmaktadır. Bir amaç fonksiyonu içeren optimizasyon yöntemlerinde sismik izolasyon sistemlerinin optimum parametrelerini belirlemek için genellikle çatı katı ivmesi amaç fonksiyonu olarak belirlenir. Değişkenler ise Q/W ve izolasyon periyodudur. Kısıt olarak ise izolatör deplasmanı ve sönüm oranı kullanılır. Kısıtlar ile belirlenen arama uzayı içinde amaç fonksiyonunu minimuma yakınsayarak en uygun sonuçlar belirlenir. Bu genel anlamda sismik izolasyon sistemlerinin yapı tepkilerini göz önüne alarak belirlenmesindeki klasik metotlarla uyumludur.

Bu çalışmada ise hazırlanan yazılım sayesinde tekrarlı çözümler yapılarak belirlenen arama uzayındaki tüm çözümler elde edilmiştir. Çözümler grafik haline getirilerek istenilen durumlar için uygun izolasyon parametreleri belirlemek mümkündür. Klasik ve optimizasyon metotlarında olduğu gibi bu çalışma da kısıt olarak öncelikle izolasyon deplasmanı ve sönüm oranı grafikleri ele alınıp belirlenen limitlere göre uygun parametreler belirlenebilir. Sonrasında ise çatı katı ivmesi grafiğı üzerinden en düşük ivme değeri veren izolatör parametreleri belirlenerek izolatör tasarımı tamamlanabilir. Şekil 4.12’de örnek olarak 3 katlı örnek modelin ortalama parametreleri kullanılarak önerilen yöntem uygulanmıştır. Akma deplasmanının 0.01m, izolatör deplasmanının 0.4m ve sönüm oranının %25 olduğu limitler seçilerek optimum izolatör parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 4.12. İzolasyon parametrelerinin optimum sonucunu bulmak için önerilen yöntemin örnek uygulaması

Hazırlanan yazılım sayesinde üretilen izolasyon parametrelerine göre yapı tepkileri grafikleri elde edilmiştir. Örnek uygulamada öncelikle izolasyon deplasmanı ve sönüm oranı limitlendiğinden bu grafiklerden başlanmıştır. Grafiklerin limitleri içine kalan kısımları mavi, limitler dışında kalan kısım kırmızı (yatay) olarak işaretlenmiştir. İkinci grafiklerde ise limitler içinde kalan izolasyon parametreleri mavi limitler dışında kalan kısım ise (düşey) kırmızı işaretlenmiştir. Örnek çalışmada, limit olarak izolasyon deplasmanı ve sönüm oranı incelendiğinden, iki grafiğin kırmızı ve mavi alanları çakıştırılmıştır. Son seçim grafiği olan çatı katı ivmesi grafiğinin üzerine yerleştirilerek üçüncü grafik elde edilmiştir. Bu grafikteki

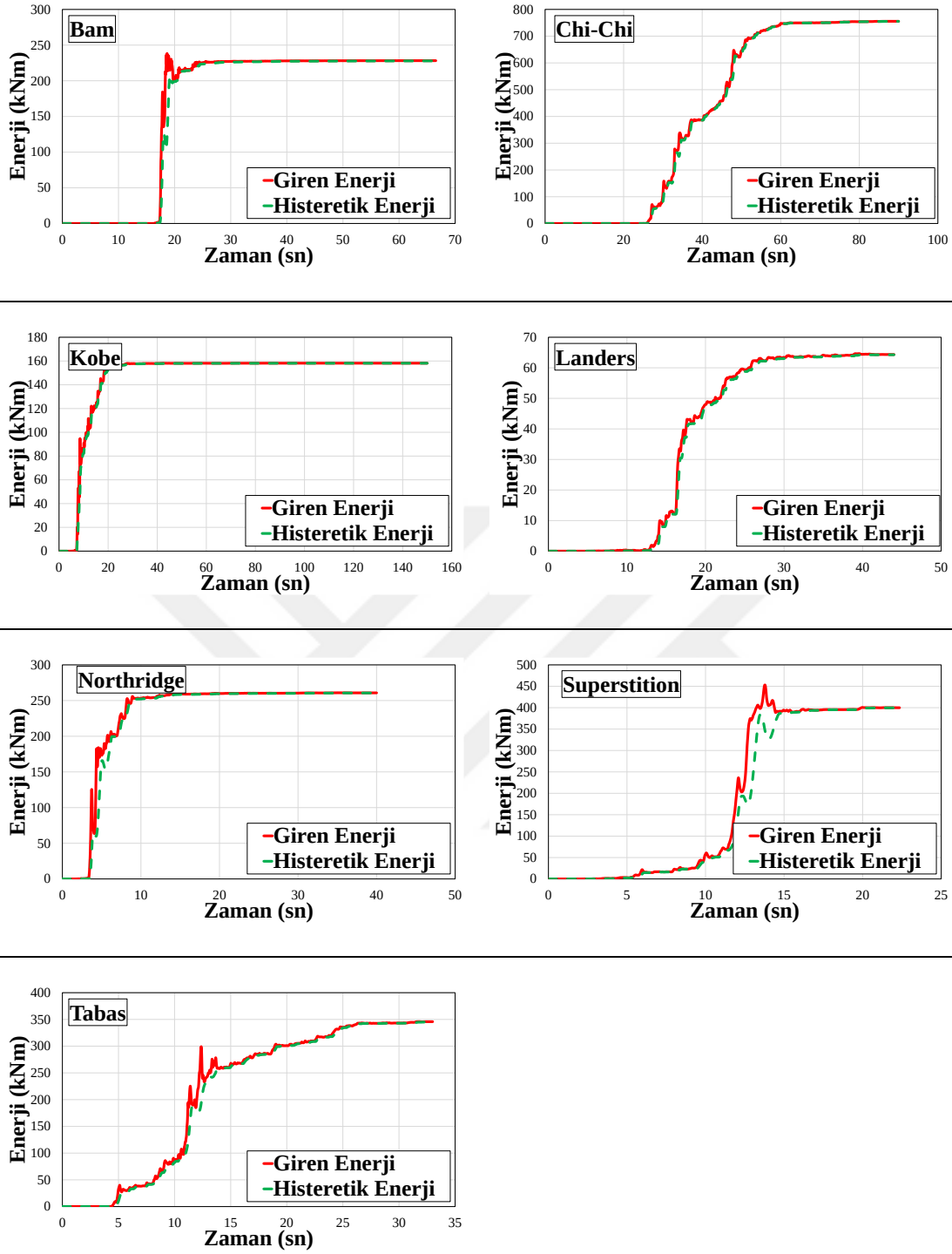
mavi alana denk gelen izolasyon parametreleri limitler içinde kalan uygun izolasyon parametrelerini göstermektedir. Hazırlanan bu grafik sayesinde yapıda oluşacak en düşük çatı katı ivmesi değeri belirlenerek en uygun izolasyon parametreleri elde edilmiştir.

Ortalama deprem değerlerinde, 3 katlı yapıda, D_y 0.01 m iken önerilen yöntemle belirlenen optimum izolasyon parametreleri; 0.09 Q/W ve 3.05 sn T_0 değerleri olarak belirlenmiştir. Bu izolasyon parametrelerine göre k_1 değeri 2918.06 kN/m, F_y değeri 29.18 kN, k_2/k_1 oranı 0.04579 olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucu izolatör deplasmanı 0.399 m, yapının çatı ivmesi 0.519 g ve sönüm %23.4 olarak bulunmuştur. Optimum izolasyon parametreleri ile izolasyonlu örnek model için belirlenen enerji dengeleri kullanılan deprem ivme kayıtlarına göre Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Optimum izolasyon parametreleri ile izolasyonlu örnek model için belirlenen enerji dengeleri

İvme Kaydı	Önerilen Yöntemle Elde Edilmiş Enerji Dengeleri			
	Giren Enerji (kNm)	Kinetik Enerji (kNm)	Potansiyel Enerji (kNm)	Histeretik enerji (kNm)
Tabas	346.056	106.1275	7.4428	345.4959
Landers	64.6291	9.0992	2.253	64.2664
Superstition	453.8618	187.8594	14.9424	400.1189
Northridge	261.3224	121.0354	8.908	261.0454
Kobe	158.2074	43.2274	3.2262	158.1528
Bam	238.4936	130.0399	9.6137	227.8587
Chi-Chi	755.5675	81.4165	8.4469	755.3454

Tablo 4.1’e göre en yüksek giren enerji Chi-Chi ivme kaydında belirlenirken en düşük giren enerji Landers ivme kaydında olmuştur. Üst yapının doğrusal modellendiği ve çelik bir çerçeveden oluşan örnek modellerde giren enerjinin büyük oranı histeretik enerji olarak sismik izolatörler tarafından sönümlenmiştir (Şekil 4.13). Bu sayede üst yapı elemanları şekil değişikliğine neden olacak enerjiden korunmuştur.



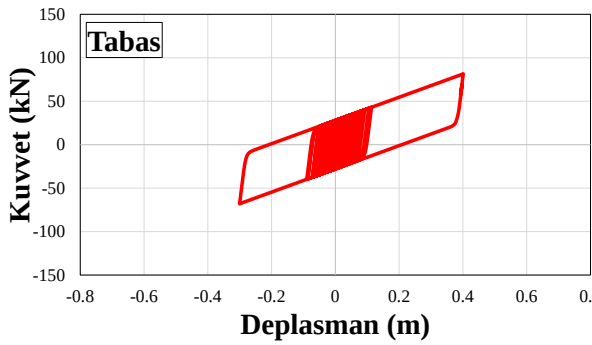
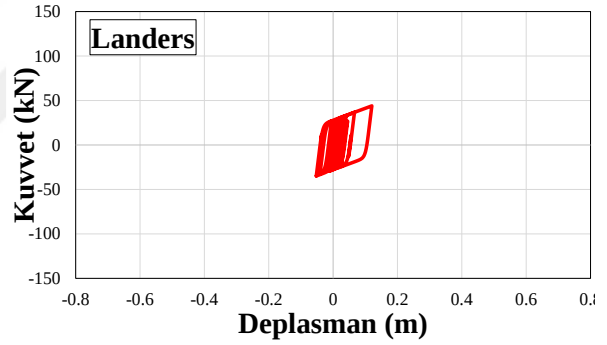
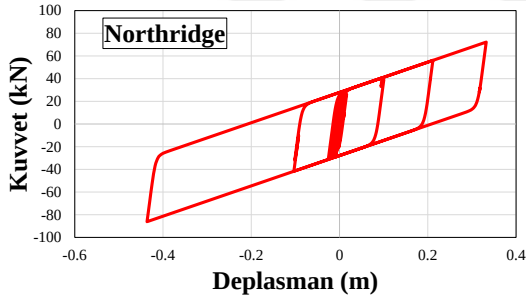
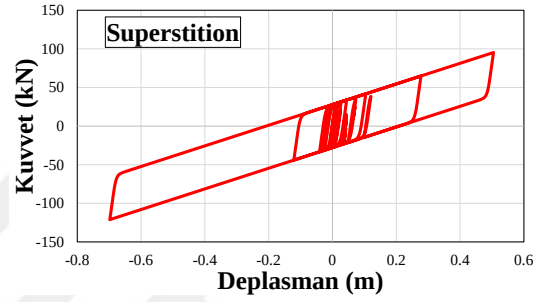
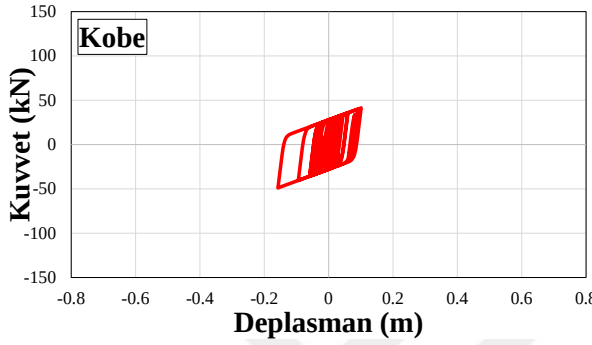
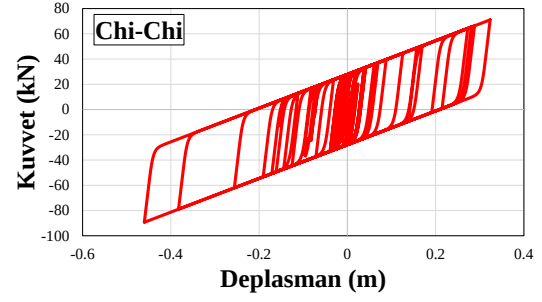
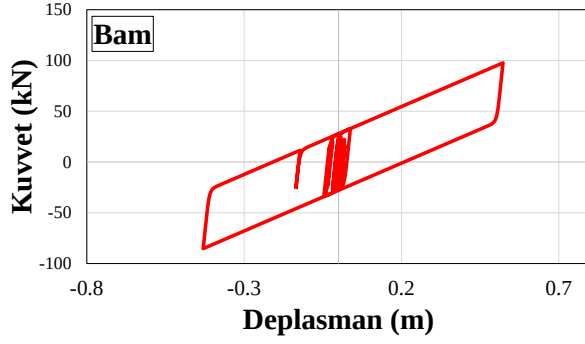
Şekil 4.13. Depremlerin 3 katlı örnek yapı üzerindeki giren enerji diyagramları

Ayrıca çalışmada daha önceki bir çalışmada kullanılan ifade ile inceleme yapılmıştır (Artar & Carbas, 2022). Bu ifade giren enerjinin sismik izolatörler tarafından sönmülenmeyerek üst yapıda şekil değişikliği yapacak enerjiyi tarif etmektedir. Tablo 4.2’de deprem ivme kayıtlarına göre bu değerler verilmiştir.

Tablo 4.2. Giren enerji ve histeritik enerji farkının giren enerjiye oranı

İvme Kaydı	$(E_i - E_h) / E_i * 100$
Bam	30.03
Chi-Chi	0.18
Kobe	2.08
Landers	0.49
Northridge	17.28
Superstition	19.08
Tabas	2.19

Tablo 4.2'ye göre en büyük oran Bam ivme kaydı için en küçük oran ise Chi-Chi ivme kaydı için elde edilmiştir. Tablo 4.2'de yer alan enerji farkı oranları, sistemin enerjiyi sönümleme kapasitesini yansıtmaktadır. Bam, Northridge, ve Superstition kayıtlarında yüksek enerji farkı oranları, yapının yükü büyük ölçüde üzerine aldığını ve izolatörün etkin bir şekilde enerji sönümleyemediğini göstermektedir. Bu durum, yapıya iletilen yüklerin artmasına sebep olmuştur. Öte yandan, Chi-Chi, Kobe, ve Landers kayıtlarında düşük enerji farkı oranları izolatörün daha etkin çalıştığını ve enerjinin büyük kısmını sönümlediğini işaret etmektedir. Enerji farkı oranları, sismik izolasyon tasarımında incelenmesi gereken bir parametre olduğu ortaya konulmuştur. Belirlenen optimum izolasyon parametrelerine göre ivme kayıtları ile yapılan analizler sonucu elde edilen izolatör kuvvet deplasman eğrileri Şekil 4.14'de verilmiştir.



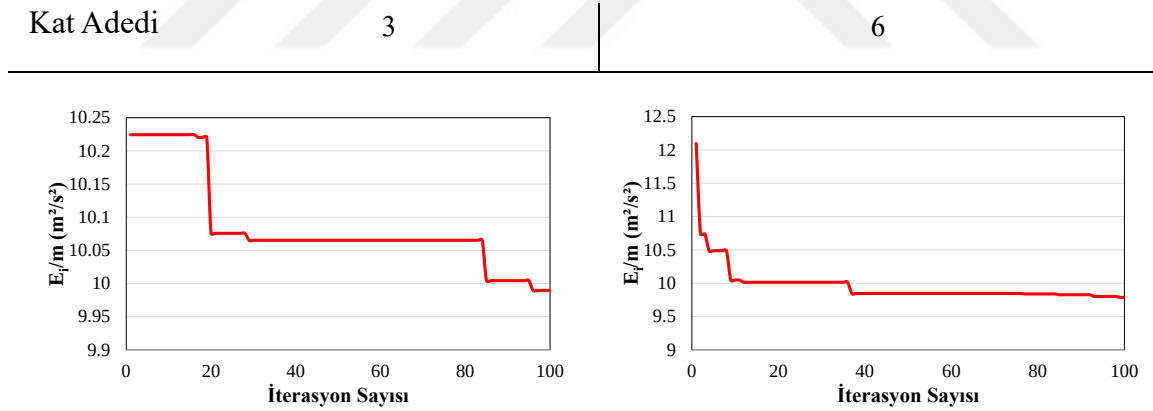
Şekil 4.14. Deprem ivme kayıtlarına göre optimum izolasyon parametreleri ile belirlenen kuvvet deplasman eğrileri

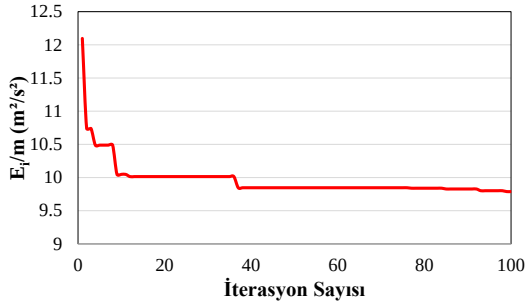
Şekil 4.14’de deplasman ve kuvvet eğrileri incelendiğinde, en yüksek deplasman değerinin Superstition kaydında ortaya çıktığı, en düşük deplasmanın ise Landers kaydında

gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Bu, Superstition kaydının sistemde daha fazla yer değiştirme yarattığını, dolayısıyla yapıyı daha fazla zorladığını göstermektedir. Buna karşılık, Landers ve Kobe gibi kayıtlar düşük deplasman değerleri ile sistemde daha az enerji tüketimine yol açmıştır. Önerilen yöntemde kullanılan yapı tepkileri ve sismik izolasyon sönümü ortalama değerler için yapıldığından limit değer üzerinde deplasman değerleri bulunmuştur. Grafiklerdeki histeretik davranış içinde kalan alan, izolatörlerin enerji sönümleme kapasiteleri ile doğrudan ilişkilidir ve sistemin farklı deprem senaryolarına verdiği tepkiyi ortaya koymaktadır.

4.3. GWO ile Optimum İzolasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu bölümde giren enerji amaç fonksiyonu olarak kullanılarak optimum izolasyon parametreleri belirlenmiştir. Optimizasyon sürecinde D_y 0.01m olarak belirlenmiştir. Önceki bölümlerde verilen 7 ivme kaydı kullanılarak en büyük giren enerji, deplasman ve sönüm oranını veren depremler amaç fonksiyonunda göz önüne alınmıştır. Bu sayede tüm ivme kayıtlarını kapsayan optimum izolasyon parametreleri elde edilmiştir. D ve β limitleri sırasıyla 0.4m ve %25 alınarak optimizasyon işlemi tamamlanmıştır. Şekil 4.15'te optimizasyon süreçlerini gösteren yaklaşım eğrileri verilmiştir.





Şekil 4.15. 3, 6 ve 9 katlı yapının GWO algoritması ile E_i/m oranının yaklaşım eğrisi

Yaklaşım eğrilerine göre 3 model için de optimum izolasyon parametreleri E_i/m kullanılarak başarı ile hesaplanmıştır. E_i/m değerleri 9 ile 10 arasında değerler bulunmuştur. Optimum sonuca en hızlı yakınsayan model 6 ve 9 katlı modeller olurken göreceli olarak 3 katlı model en yavaş yaklaşımı sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre 3, 6 ve 9 katlı yapılar için Tablo 4.3 'de verilen izolasyon parametreleri bulunmuştur.

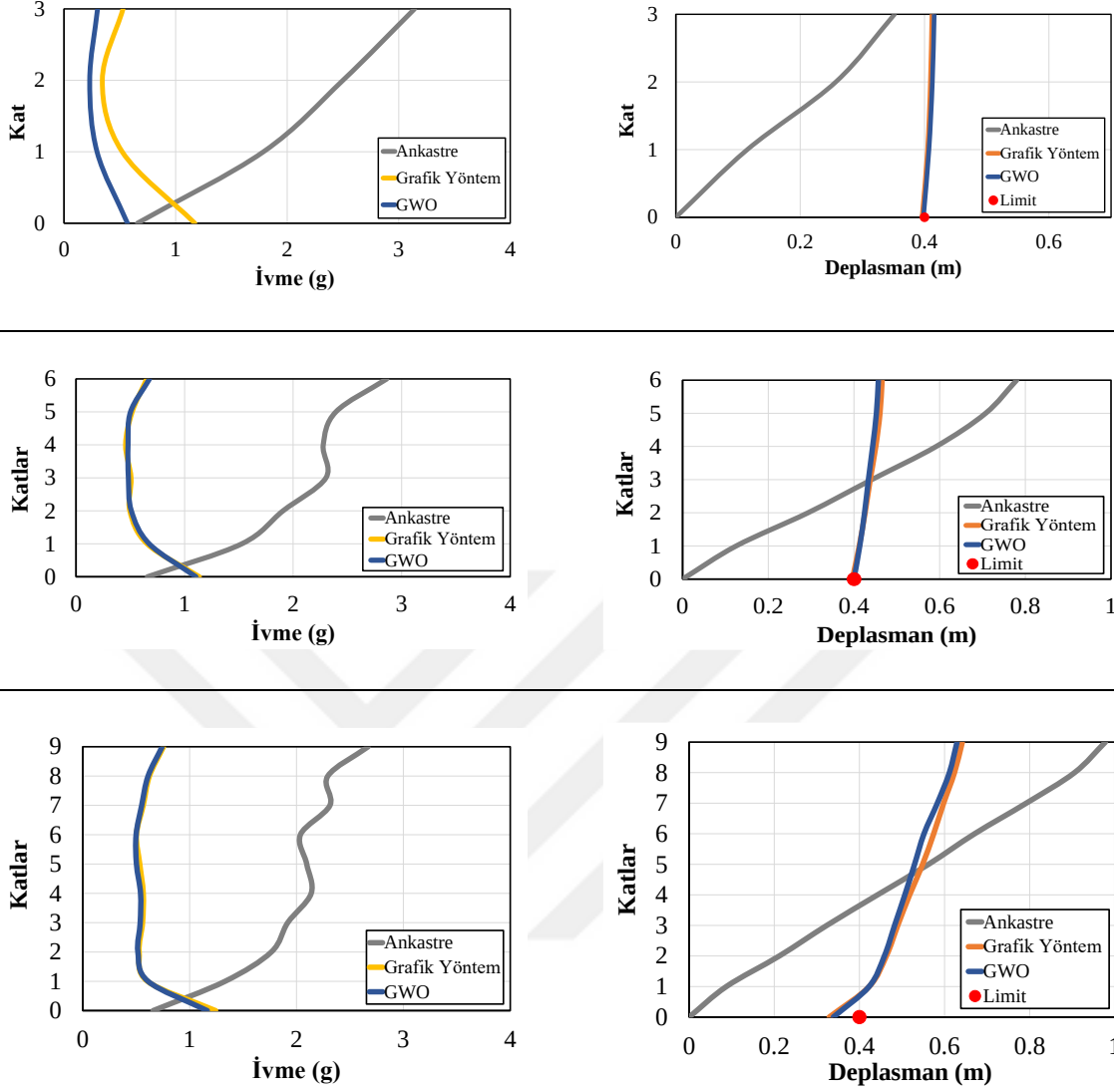
Tablo 4.3. GWO ile Optimum İzolasyon Parametreleri

Kat Sayısı	T_0	Q/W
3	3.225	0.1048
6	3.254	0.1035
9	3.274	0.1003

Tablo 4.3'te, GWO (Grey Wolf Optimizer) algoritması kullanılarak elde edilen optimum izolasyon parametreleri sunulmuştur. Daha önce kullanılan grafik yöntemine tekrarlı analizle bulunan sonuçlara kıyasla GWO, enerji sönümleme ve izolasyon performansında daha hassas sonuçlar hesaplamıştır. Bu sonuçlar, farklı yapı senaryolarında optimum izolasyon parametrelerinin belirlenmesi için GWO algoritmasının etkinliğini ortaya koymaktadır.

4.4. Grafik ve GWO sonuçlarının karşılaştırılması

Bu bölümde, grafik yöntemle elde edilen sonuçlar ile GWO ile bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kullanılan 7 ivme kaydının ortalama ivme ve deplasman değerleri Şekil 4.16'da katlara göre verilmiştir.



Şekil 4.16. Ankastre, grafik yöntem ve GWO için ivme ve deplasman karşılaştırmaları

Şekil 4.16'a göre grafik yöntem ile GWO'nun hesapladığı sonuçlar birbirlerine kat ivmeleri ve deplasmanları açısından benzerlik göstermektedir. Sadece GWO'nun belirlediği izolasyon parametrelerine göre 3 katlı yapının ivme değerleri grafik yönteme oranla daha düşük hesaplanmıştır. Bu da enerji esaslı optimizasyonun başarımının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca deplasman ve ivme açısından ankastre yapılara göre tüm örnek izolasyonlu modellerde ciddi iyileştirmeler olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Enerji esaslı sismik tasarım, araştırmacılar tarafından giderek daha fazla incelenen bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada da tabanı izole çelik çerçevelerin izolasyon parametreleri, yapıya giren enerji göz önüne alınarak optimize edilmiştir. Enerji esaslı tasarımda öncelikle belirlenmesi gereken, yapıya giren enerji miktarıdır; bu değer, etkiyen ivme kaydı, yapı tipi ve yapı davranışıyla değişkenlik göstermektedir. Sismik izolasyonlu yapılarda ise bu değişim, izolasyon parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, D_y , Q/W ve T_0 gibi izolasyon parametrelerinin farklı kat yüksekliklerine sahip yapılarda ve farklı ivme kayıtları altında nasıl değiştiği incelenerek optimum izolasyon parametreleri belirlenmiştir. Öncelikle yapı tepkilerinin kullanıldığı grafik bir yöntem uygulanarak 200 farklı izolasyon sistemi oluşturulmuş, ardından 3 farklı sismik izolasyonlu örnek modele 7 farklı ivme kaydı kullanılarak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Sismik izolasyon parametreleri olarak akma deplasmanı, periyot ve Q/W oranları seçilmiş; hazırlanan program yardımıyla her model ve ivme kaydı için toplam 4200 doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, farklı izolasyon parametrelerinin, kat sayısının ve ivme kayıtlarının yapı tepkileri ile giren enerji üzerindeki etkileri detaylı şekilde kıyaslanmıştır. Bu süreçte T_0 ve Q/W değerleri sabit tutularak izolatörün efektif rijitliği ayarlanmış ve diğer parametreler üzerindeki değişimler analiz edilmiştir. Sonuç olarak, giren enerjinin sismik izolasyon sistemlerinin optimizasyonunda kullanılabilirliği görülmüş, ardından Gri Kurt Sezgisel Optimizasyon Algoritması (GWO) ile optimum izolasyon parametreleri tekrar hesaplanarak önerilen grafik yöntem ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Giren enerji/kütle oranının en düşük olduğu durum, 6 katlı, 0,01 m akma deplasmanına sahip, Q/W oranının 0.03 ve periyodun 3,37 sn olduğu koşullarda gözlemlenmiştir. En yüksek giren enerji/kütle oranı ise, 3 katlı, 0.025 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.03 ve periyodun 2.0 sn olduğu durumda elde edilmiştir. Bu durum, daha düşük kat sayısına ve yüksek periyot değerine sahip yapıların, sismik enerjiyi daha yüksek oranlarda sönümlendiğini ve daha fazla enerjiye maruz kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla, yapıların kat sayısının azaltılması ve periyot ile akma deplasmanının belirlenmesi, yapıya giren enerjiyi kontrol altında tutmak açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle enerji esaslı sismik tasarım için, yapının kat sayısının ve izolasyon parametrelerinin uygun seçimi, sistemin stabilitesini sağlamada temel faktörlerden biridir.

Deplasman (D) açısından yapılan analizlerde, en düşük değer 9 katlı, 0.01 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.15 ve periyodun 2.0 saniye olduğu durumda; en yüksek değer

ise 3 katlı, 0.025 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.03 ve periyodun 4.0 saniye olduğu koşullarda elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, farklı kat sayılarına sahip yapılarda izolatör performansının önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğini ve kat sayısının izolatör deformasyonuna olan etkisinin belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle yüksek katlı yapıların ve kritik binaların sismik izolasyon sistemlerinde, izolatörlerin deformasyon taleplerinin daha kontrollü bir şekilde yönetilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda, yüksek katlı yapılarda izolatörlerin yüksek deplasman kapasitesine sahip olması yerine rijitliği artırıcı parametrelerle tasarlanması önerilmektedir. Bu bulgu, yüksek katlı ve kritik yapılarda izolatör tasarımında kat sayısına göre uygun deformasyon sınırlarının belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle periyot ve Q/W oranının uygun seçimiyle, izolatörlerin deformasyon talepleri kontrol altına alınarak yapı stabilitesi sağlanabilir. Aynı zamanda, düşük katlı yapılarda daha büyük deplasman kapasitelerine sahip izolasyon sistemlerinin kullanılması gerektiğini göstermektedir.

İvme (a) açısından analiz edildiğinde, en düşük ivme değerinin 3 katlı, 0.025 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.03 ve periyodun 4.0 sn olduğu durumda elde edildiği, en yüksek ivme değerinin ise 9 katlı, 0.01 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.15 ve periyodun 2.0 sn olduğu durumda gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu durum, kat sayısının artmasının üst katlarda ivme taleplerini artırdığını ve dolayısıyla yapı tepe ivmesinin yüksek katlı yapılarda daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Yüksek ivme değerlerinin yapı performansı üzerindeki etkisini minimize etmek amacıyla, kat sayısının optimize edilmesi ve sismik izolasyon parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Yapıların sismik performansının iyileştirilmesi için, tepe ivmesinin düşürülmesi esas alınmalıdır.

Sönüm oranı (β) açısından elde edilen sonuçlara göre, en düşük değerin 3 katlı, 0.025 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.03 ve periyodun 2.0 sn olduğu durumda görüldüğü, en yüksek değerin ise 3 katlı, 0.01 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.15 ve periyodun 4.0 sn olduğu koşullarda elde edildiği belirlenmiştir. Bu sonuç, sönüm oranının Q/W oranı ve periyot gibi izolasyon parametrelerine karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Daha yüksek Q/W oranlarının sönüm kapasitesini artırdığı ve yapının sismik enerjiyi daha verimli bir şekilde sönümlediği anlaşılmaktadır.

Taban kesme/kütle (V_{te}/m) açısından değerlendirildiğinde, en düşük değerin 9 katlı, 0.01 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.06 ve periyodun 4.0 sn olduğu durumda, en yüksek değerin ise 3 katlı, 0.025 m akma deplasmanında, Q/W oranının 0.03 ve periyodun 2.0

sn olduğu durumda elde edildiği belirlenmiştir. Bu gözlem, taban kesme kuvvetinin daha yüksek katlı yapılarda azaldığını ve düşük kat sayılı yapılarda taban kesme kuvvetinin daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, sismik yüklerin taban kesme kuvveti üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla, kat sayısı ve izolasyon parametrelerinin titizlikle değeriendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle taban kesme kuvveti kontrolünün kritik olduğu yapılarda, kat sayısının düşürölmesi ve periyot ile akma deplasmanının uygun seçilmesi gerekmektedir.

Yapılan analizlerde, sismik izolasyonlu yapıların performansı üzerinde izolasyon katı deplasmanı (D), yapı tepe ivmesi (a), efektif sönüm (β) ve giren enerji/kütle oranı (E_i/m) arasındaki ilişkiler dikkat çekici bulgular sunmuştur. İzolasyon katı deplasmanı ile giren enerji arasında genel olarak ters orantılı bir ilişki gözlemlenmiş olup, deplasmanın azaldığı durumlarda yapıya giren enerji/kütle miktarının arttığı görölmüştür. Bu durum, kütleyle orantılı olarak izolatörlerin yüksek enerjiye maruz kaldıklarında daha az hareket ederek enerjiyi doğrudan yapıya aktarma eğiliminde olduklarını düşündürmektedir. Bu gözlem, izolasyon sistemlerinde deplasman gereksinimlerinin optimize edilmesi için giren enerji seviyelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Yapı tepe ivmesi ile giren enerji arasında ise doğru orantılı bir ilişki tespit edilmiştir. Sismik izolasyonlu yapılarda önemli bir performans kriteri olan yapı tepe ivmesinin düşürölmesi için giren enerji seviyesinin azaltılması gerekliliği ortaya konulmuştur. Bu sonuç, enerji esaslı sismik tasarım yaklaşımlarında giren enerji seviyelerinin optimize edilmesinin, yapı tepe ivmesinin kontrol altına alınmasında doğrudan etkili olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, efektif sönüm (β) ile giren enerji arasındaki ters orantılı ilişki, sönüm kapasitesi arttıkça yapıya giren enerji miktarının azaldığını ortaya koymaktadır. Sönüm kapasitesinin yüksek olduğu durumlarda yapının sismik yüklere karşı daha dayanıklı bir performans sergilediği anlaşılmıştır. Bu durum, efektif sönümün izolasyonlu yapılarda giren enerji seviyesini azaltmak için kritik bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Son olarak, giren enerjinin kat sayısına göre değışkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle 3 katlı ve 9 katlı yapılarda izolasyon parametreleri ile giren enerji seviyelerinin farklı şekillerde değışim gösterdiği gözlenmiştir. Kat sayısının yapıya giren enerjiyi kontrol etmede önemli bir faktör olduğu anlaşılmakta olup, enerji esaslı tasarımda kat sayısının dikkatle optimize edilmesinin yapı güvenliği açısından gerekli olduğu sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlar kullanılarak örnek yapıların tüm depremlere göre ortalama parametreleri kullanılarak grafik bir yöntem önerilmiştir. Limit olarak akma deplasmanının 0.01m, izolatör deplasmanının 0.4m ve sönüm oranının %25 olduğu değerler seçilerek optimum izolatör parametreleri belirlenmiştir.

Grafik sonuçlarda kullanılan kısıtlar ile giren enerjiyi amaçlayan GWO ile tekrar optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçların birbirlerine yakınsadığı görülmüş olup giren enerjinin sismik izolasyon sistemlerinin optimizasyonunda kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, enerji esaslı sismik tasarımda izolasyon parametrelerinin ve izolatör parametrelerinin yapı performansı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. İzolasyon sisteminin stabilitesi ve güvenliği açısından, izolatör parametrelerinin optimize edilmesi ve izolasyon parametrelerinin dikkatle seçilmesi, sismik izolasyonlu yapıların performansını artırmak için esaslı bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir.

Enerjinin sismik izolasyon tasarımında bir kontrol ve tasarım değişkeni olarak kullanılabileceği görülmektedir. Yapıya giren enerji ile izolatörün taşıdığı enerji arasındaki etkileşim analiz edilerek, enerjinin optimize edilmesi hem yapısal performansın artırılmasını hem de izolatör tasarımının iyileştirilmesini sağlayabilir. Enerji tabanlı çalışmalar, izolatörün deplasman limitlerinin belirlenmesi, sönümleme kapasitesinin değerlendirilmesi ve yapıdaki enerji dağılımının optimize edilmesi gibi parametrelerin kontrolünde önemli bir rol oynayabilir. Bu doğrultuda, enerjinin bir optimizasyon parametresi olarak kullanıldığı analizler ile sismik izolasyon sistemlerinin performans kriterlerine uygun çözümler üretmek mümkün olacaktır. Bu tür çalışmalar, yapıya giren enerjinin minimize edilmesi ve izolatörün enerjiyi sönümleme kapasitesinin en üst düzeye çıkarılması için gelecekte yapılacak çalışmalar için kritik bir yol haritası oluşturabilir.

KAYNAKÇA

- Abrar, O.** (2018). Uzun periyotlu ve güçlü deprem etkilerinde kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlü yapıların davranışının incelenmesi. Samsun: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Adeli, H., & Sarma, K. C.** (2006). *Cost optimization of structures: Fuzzy logic, genetic algorithms, and parallel computing*. John Wiley & Sons.
- Akbaş, B., & Shen, J.** (2003). Earthquake resistant design and energy concepts. *İMO Teknik Dergi*, 2877-2901.
- Akiyama, H.** (1988). Earthquake resistant design based on the energy concept. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, IAEE: Tokyo, Japan*, 5, 905-910.
- Alhan, C., & Sürmeli, M.** (2011). Shear building representations of seismically isolated buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(5), 1643-1671. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9293-z>
- Alhan, H., & Gazi, C.** (2013). Sismik izolasyon sistemi parametrelerindeki rastgele değişimlerin Monte Carlo Simülasyon Metoduyla incelenmesi. 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Hatay.
- Alıcı, F. S.** (2019). Energy-based seismic assessment and design. Middle East Technical University.
- American Society of Engineers, S. E.** (2010). Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10).
- Artar, M., & Carbas, S.** (2022). Optimum sizing design of steel frame structures through maximum energy dissipation of friction dampers under seismic excitations. *Structures*, 44, 1928-1944.
- AYHAN, C.** (2005). Yapılarda değişken frekanslı sürtünmeli elemanlar ile sismik kontrol. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azizi, M.** (2019). Energy based evaluation of RC frame structures. Ankara: Master of Science in Civil Engineering Department, Middle East Technical University.
- Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., & Yang, X. S.** (2019). *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*. Cham, Switzerland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26245-1>
- Bhatia, H. L.** (1990). *Engineering mechanics: Dynamics*. McGraw-Hill.

Börekçi, H. (2019). Experimental investigation of inelastic SDOF steel structures using energy-based principles. İstanbul: Boğaziçi University.

Camp, C. V., & Bichon, B. J. (2004). Design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Structural Engineering*, 130(5), 728-737. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:3\(369](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:3(369)

Canbay, E., Ersoy, U., Özcebe, G., Sucuoğlu, H., & Wasta, S. (2008). *Binalar için deprem mühendisliği temel ilkeler*. Bizim Büro Basımevi.

Celep, Z. (2017). *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı*. Beta Basım Yayın Dağıtım A. Ş.

Chopra, A. K. (2011). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Civil Engineering and Engineer.

Choun, Y.-S., Park, J., & Choi, I.-K. (2014). Effects of mechanical property variability in lead rubber bearings on seismic isolation systems. *Nuclear Engineering and Technology*, 46(5), 605-618. <https://doi.org/10.5516/NET.09.2014.718>

Computers and Structures, Inc. (2020). *SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design* (Version 24.0.0) [Manual]. Berkeley, CA: Computers and Structures, Inc. <https://docs.csiamerica.com/manuals/sap2000/CSiRefer.pdf>

Constantinou, M. C. (1998). Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. Buffalo, NY: Multidisciplinary Center for Earthquake Research.

Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. (2007). Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading. *Technical Report MCEER*.

Çağlar, M. C. (2002). Yapılarda taban izolasyonu sistemleri. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çavdar, E., & Özdemir, G. (2018). Ölçeklendirilen yakın saha deprem kayıtlarının farklı doğrultularda etkimesi durumunda yalıtım birimi maksimum yer değiştirmelerinde gözlenen değişim. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 585-598.

Çerçevik, A. E., & Avşar, Ö. (2020). Doğrusal sismik izolasyon parametrelerinin karga arama algoritması ile optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(3), 440-447.

Çerçevik, A. E., Avşar, Ö., & Hasaıçebi, O. (2020). Optimum design of seismic isolation systems using metaheuristic search methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106012>

Decanini, L., & Mollaioli, F. (2001). An energy-based methodology for the assessment of seismic demand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(2), 113-137. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00102-0](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00102-0)

Dedeoğlu, İ. Ö. (2023). Yapı sistemlerinin deprem davranışının enerji esaslı yöntemlerle değeriendirilmesi. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dedeoğlu, İ. Ö., & Calayır, Y. (2021). Farklı tasarım spektrumlarına göre ölçeklenmiş deprem kayıtları etkisindeki TSD sistemlerin yapısal tepkilerinin ve giren enerjilerinin değeriendirilmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12(2), 411-430.

Dedeoğlu, İ. Ö., & Calayır, Y. (2024). A study on elastic input energy based on earthquakes in Turkey. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(3), 1439-1454.

Demir, A. (2023). TBDY 2018 ile uyumlu gerçek ivme kayıtları kullanılarak TSD sistemlere giren enerjinin incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11(3), 1018-1029.

Deringöl, A. H., & Mete Güneyisi, E. (2019). Effect of friction pendulum bearing properties on behaviour of buildings subjected to seismic loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105746. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105746>

Deringöl, A. H., & Mete Güneyisi, E. (2020). Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün yükseklik boyunca düzenli ve düzensiz çerçevelerin sismik tepkisine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1076-1085.

Domadzra, Y., Bhandari, M., & Hasan, M. (2024). Seismic response of base-isolated buildings exploring isolator properties. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25, 4197–4209. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01041-9>

Döker, A. T. (2020). Burulma düzensizliğine sahip taban izolasyonlu yapıların deprem davranışının incelenmesi. Bursa: Bursa Uludağ Üniversitesi.

Erbatur, F., & Hasançebi, O. (2000). Optimum design of planar and space structures with harmony search. *Engineering Optimization*, 32(4), 471-490.

Fajfar, P., & Vidic, T. (1994). Consistent inelastic design spectra: Hysteretic and input energy. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 23(5), 523-537. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290230505>

Fakih, M. H. (2021). Effect of lead-rubber bearing isolators in reducing seismic damage for a high-rise building in comparison with normal shear wall system. *Structural Durability and Health Monitoring*, 15(3), 247–260. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2021.015174>.

Faris, H. (2018). Grey wolf optimizer: A review of recent variants and applications. *Neural Computing and Applications*, 30, 413–435. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3272-5>

Gholami, N., Garivani, S., & Askariani, S. S. (2022). State-of-the-art review of energy-based seismic design methods. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(3), 1965-1996. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09645-z>

Gökhan, E. (2009). Betonarme yapılarda izolatör kullanımının taşıyıcı sistem davranışına etkileri. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.

Gray, M. G. (2013). Cast steel yielding brace system for concentrically braced frames: Concept development and experimental validations. *Journal of Structural Engineering*, 140(4), 04013095. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000910](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000910)

Gupta, P. G. (2022). Effectiveness of LRB in curved bridge isolation: A numerical study. *Applied Sciences*, 12(21), 11289. <https://doi.org/10.3390/app122111289>.

Hancıoğlu, B. (2019). Yapıların deprem davranışının enerji esaslı analizi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hiraki, T., Kanazawa, K., & Kitamura, H. (2017). Mechanical energy evaluation method for seismic isolation systems with rubber bearings under large deflection. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 82(735), 75-85. <https://doi.org/10.3130/aijs.82.75>

Housner, G. W. (1956). Limit design of structures to resist earthquakes. *Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering*, (pp. 1-11). California: Earthquake Engineering Research Institute.

- Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Yao, J. T.** (1997). Structural control: Past, present, and future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), 897-971. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897))
- Hwang, J. S.** (2013). Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients of buildings. *Structural Infrastructure Engineering*, 9(1), 28-41. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.513713>
- Ismail, M.** (2015). Elimination of torsion and pounding of isolated asymmetric structures under near-fault ground motions. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(8), 1295-1324. <https://doi.org/10.1002/stc.1746>
- Jampole, E.** (2016). High-friction sliding seismic isolation for enhanced performance of light frame structures during earthquakes. Stanford: Stanford University.
- Jangid, R.** (2007). Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions. *Engineering Structures*, 29(10), 2503-2513. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.12.013>
- Kanbir, Z., Alhan, C., & Özdemir, G.** (2022). Üstyapı sönüm oranının deprem etkisindeki kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimli binalardaki etkilerinin araştırılması. *Journal of Polytechnic*, 25(4), 655-665. <https://doi.org/10.2339/politeknik.803212>
- Kane, T. R.** (1985). *Dynamics: Theory and applications*. Prentice Hall.
- Kaveh, A., & Talatahari, S.** (2012). Size optimization of space trusses using big bang-big crunch algorithm. *Computers & Structures*, 89(13-14), 1126-1139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.03.020>
- Kaveh, A., & Zakian, P.** (2018). Improved GWO algorithm for optimal design of truss structures. *Engineering with Computers*, 34(4), 685-707. <https://doi.org/10.1007/s00366-017-0567-1>
- Kaymak, B.** (2019). En hafif kafes yapı tasarımı için bakteri yiyecek arama optimizasyon algoritmasının. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 300-314. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.548654>
- Kilar, V., & Koren, D.** (2009). Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators. *Engineering Structures*, 31(5), 910-921. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.12.013>

- Koçan, H.** (2017). Düşeyde düzensiz bina türü yapıların deprem performanslarının pasif enerji sönümleyiciler ile iyileştirilmesi. Uşak: Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Komodromos, P.** (2000). *Seismic isolation for earthquake resistant structures*. UK: WIT Press.
- Lee, C., & Ahn, J.** (2003). Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm. *Journal of Structural Engineering*, 129(6), 762-774. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:6\(762\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:6(762))
- Lie-pin, Y.** (2014). Study on the energy-based seismic design method of building structures. *Engineering Mechanics*.
- Lu, Y., & Guo, X.** (2011). A novel particle swarm optimization algorithm for structural optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 43(6), 895-910. <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0539-2>
- Manfredi, G.** (2001). Evaluation of seismic energy demand. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(4), 485-499. <https://doi.org/10.1002/eqe.17>
- Matsagar, V. A.** (2004). Influence of isolator characteristics on the response of base-isolated structures. *Engineering Structures*, 26(12), 1735–1749. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.06.011>
- Mazza, F., & Mazza, M.** (2016). Nonlinear seismic analysis of irregular RC framed buildings base-isolated with friction pendulum system under near-fault excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.08.028>
- McKevitt, W. F., Fisher, D., & Buckle, I. G.** (1980). Energy methods in seismic design. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 13(1), 13-20.
- METU.** (2020). *High damping rubber bearings (HDRBs) and their application in seismic isolation*. Ankara: METU Earthquake Engineering Research Center.
- Merter, O.** (2019). An investigation on the maximum earthquake input energy for elastic SDOF systems. *Earthq. Struct*, 16(4), 487-499.
- Merter, O., & Ucar, T.** (2017). Energy-based design base shear for RC frames considering global failure mechanism and reduced hysteretic behavior. *Structural Engineering and Mechanics*, 63(1), 23-35.

- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A.** (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Mkrtycheva, O., Dzhinchvelashvili, G., & Bunov, A.** (2014). Study of lead rubber bearings operation with varying height buildings. *Procedia Engineering*, 91, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.010>
- Naeim, F., & Kelly, J. M.** (1999). *Design of seismic isolated structures: From theory to practice*. New York: John Wiley & Sons.
- NEHRP.** (1978). *Base isolation systems using neoprene bearings for seismic protection*. ABD: NEHRP.
- NEHRP.** (2015). *Recommended seismic provisions for new buildings and other structures*. (National Earthquake Hazards Reduction Program), FEMA P-1050.
- Nigdeli, S. M., Bekdaş, G., & Alhan, C.** (2014). Optimization of seismic isolation systems via harmony search. *Engineering Optimization*, 46(11), 1553-1569. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2013.854352>
- Okur, A., & Erberik, M.** (2012, Eylül 24-28). Adaptation of energy principles in seismic design of Turkish RC frame structures. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, (s. 24-28). Lisboa.
- Okur, A., & Erberik, M.** (2014). Adaptation of energy principles in seismic design of Turkish RC frame structures. Part I: Distribution of hysteretic energy. *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 25-29.
- Özdemir, G.** (2010). Response of isolated structures under bi-directional excitations of near-field ground motions. (Doktora Tezi, Middle East Technical University, Department of Civil Engineering).
- Özdemir, G., & Bayhan, B.** (2015). Response of an isolated structure with deteriorating hysteretic isolator model. *Engineering Structures & Materials*, 15(3), 289-304.
- Özdemir, G., & Dicleli, M.** (2012). Effect of lead core heating on the seismic performance of bridges isolated with LRB in near-fault zones. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(14), 1989-2007. <https://doi.org/10.1002/eqe.2170>

- Özdemir, G., Avşar, Ö., & Bayhan, B.** (2011). Change in response of bridges isolated with LRBs due to lead core heating. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), 921-929. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.01.012>
- Özen, H.** (2023). Comparative assessment of the seismic performance of fixed base and rocking building frames equipped with an energy dissipation system. Ankara: Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- Özer, E.** (2022). Geleneksel ve taban izolasyonlu betonarme binaların sismik davranışlarının karşılaştırılması. Pamukkale: Pamukkale Üniversitesi.
- Özpalanlar, C. G.** (2004). Depreme dayanıklı yapı tasarımında sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk, H.** (2022). Sismik izolasyonlu yapıların tasarımında kullanılan analiz yöntemlerinin karşılaştırılması. *Journal of Institute of Science and Technology*, 12(1), 117-127.
- Polat, H. İ.** (2019). Betonarme bir yapıda geleneksel yöntem ve taban izolatörü kullanımının karşılaştırmalı analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 43-54. <https://doi.org/10.31590/ejosat.495856>
- Products-Base Isolator.** (2019). Dynamic Isolation Systems. Retrieved from <https://www.dis-inc.com/products.html>
- Providakis, C. P.** (2008). Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations. *ScienceDirect Engineering Structures*, 30(5), 1187-1198. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.020>
- Robinson, W. H.** (1982). Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(4), 593-604. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100408>
- Robinson, W., & Tucker, A.** (1977). A lead-rubber shear damper. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 10(3), 151-153.
- Ryan, K. L., & Chopra, A. K.** (2004). Estimation of seismic demands on isolators based on nonlinear analysis. *Journal of Structural Engineering*, 130(3), 392-402. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:3\(392\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(392))

- Shen, P.-S., & Liu, Z.** (2009). Evaluation of hysteretic energy to input energy ratio in tall hybrid structures. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 29(2), 73-78.
- Simsek, A., Özdemir, G., & Yazgan, U.** (2024). Effect of lead core heating on residual displacements of lead rubber bearings under bi-directional earthquake excitations. *Journal of Earthquake Engineering*, 1–23. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2391444>
- Song, Z., Zhai, C., Ma, Y., Wang, Z., & Pei, S.** (2024). Multi-stage and multi-objective design optimization for improving resilience of base-isolated hospital buildings. *Engineering Structures*, 304, 117644. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117644>
- Soong, T. T.** (2002). Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243-259. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00092-X)
- Spencer, B. F.** (2003). State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845-856. [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845))
- Sutcu, F.** (2006). Energy-based design of a system combined of damper and displacement controller for seismically excited structures. Sendai: Tohoku University Graduate School of Engineering.
- Symans, M. D.** (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21(6), 469-487. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00225-3)
- Symans, M. D.** (2008). Energy dissipation systems for seismic applications: Current practice and recent developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), 3-21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3)
- TBDY.** (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- The MathWorks Inc.** (2022). MATLAB (R2021b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. Retrieved from <https://www.mathworks.com>
- Toplu, E., & Kirtel, O.** (2021). Sismik taban yalıtımlı yapılarda zaman tanım alanında analiz ve artımsal tek modlu itme yöntemlerinin karşılaştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(2), 123-131. <https://doi.org/10.46810/tdfd.897951>

Turan, G., & Aydın, E. (2011). Değişken sönümleme katsayılı amortisörlerin deprem simülasyonu. İzmir: TÜBİTAK.

Tyler, R., & Robinson, W. H. (1984). High-strain tests on lead-rubber bearings for earthquake loadings. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 17(2), 90-105.

Uang, C. M. (1988). Use of energy as a design criterion in earthquake resistant design. *Technical Report UCB/EERC-88/18*. Berkeley, CA: University of California.

Uang, C., & Bertero, V. V. (1990). Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19(1), 77-90. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290190108>

Weisman, J., & Warn, G. (2012). Stability of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings. *Journal of Structural Engineering*, 138(2), 215-223. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000459](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000459)

Wong, K. (2004). Inelastic seismic response analysis based on energy density spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(2), 315-334. <https://doi.org/10.1080/13632460409350491>

Xinzheng, L. (2012). Study on energy-based seismic design method and application on steel braced frame structures. *Journal of Building Structures*.

Yanık, A. (2014). Yapısal kontrol altında yapıya giren enerjinin incelenmesi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yu, Z. (1999). Research and development of structural seismic design based on energy method. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*.

Zahrah, T. F., & Hall, W. J. (1984). Earthquake energy absorption in SDOF structures. *Journal of Structural Engineering*, 110(8), 1757-1772. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:8\(1757\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:8(1757))

Zayas, V. L. (1987). The FPS earthquake resisting system: Experimental report. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No UCB/EERC-87/01*.

Zhong, W., Liu, Y., Mercan, O., & Zhou, F. (2022). Investigations of the effects of a passive bumper on the seismic response of base-isolated buildings: Experimental study and parameter optimization. *Journal of Vibration and Control*, 29(13-14), 2842-2853. <https://doi.org/10.1177/10775463221086351>